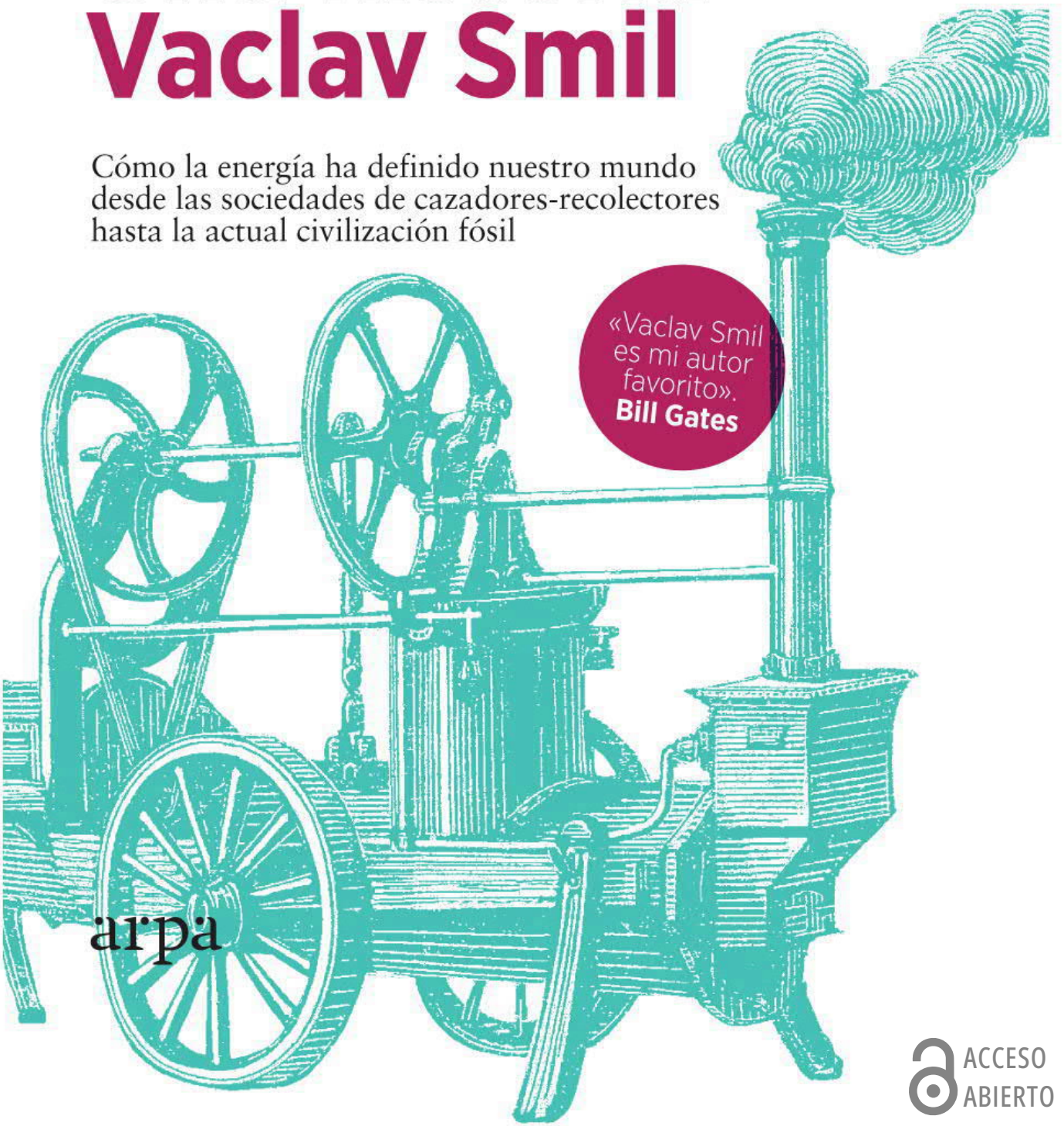
Energía y civilización. Una historia

Vaclav Smil

Cómo la energía ha definido nuestro mundo desde las sociedades de cazadores-recolectores hasta la actual civilización fósil



«Vaclav Smil es mi autor favorito». **Bill Gates**

arpa

ACCESO ABIERTO

ENERGÍA Y CIVILIZACIÓN.
UNA HISTORIA

Título original: *Energy and civilization. A history*

© del texto: Vaclav Smil, 2018
© de la traducción: Álvaro Palau Arvizu, 2021
© de esta edición: Arpa & Alfil Editores, S. L.

Primera edición: septiembre de 2021

ISBN: 978-84-18741-17-3
Depósito legal: B 13110-2021

Diseño de colección: Enric Jardí
Diseño de cubierta: Anna Juvé
Maquetación: Àngel Daniel
Producción del ePub: booqlab

Arpa
Manila, 65
08034 Barcelona
arpaeditores.com

Reservados todos los derechos.

Licencia Creative Commons 4.0 Internacional
(Atribución-No comercial-Compartir igual)

Vaclav Smil

ENERGÍA Y CIVILIZACIÓN. UNA HISTORIA

Traducción de Álvaro Palau Arvizu

arpa

SUMARIO

1. ENERGÍA Y SOCIEDAD

Flujos, reservas y controles

Conceptos y medidas

Dificultades y advertencias

2. LA ENERGÍA EN LA PREHISTORIA

Sociedades de cazadores-recolectores

Orígenes de la agricultura

3. AGRICULTURA TRADICIONAL

Puntos en común y particularidades

Trabajo de campo

El dominio de los granos

Ciclos de cultivo

El camino hacia la intensificación de la agricultura

Animales de tiro

Riego

Fertilización

Diversidad de cultivos

Constancia y progreso

Antiguo Egipto
China
Culturas mesoamericanas
Europa
América del Norte

Los límites de la agricultura tradicional
Éxitos
Nutrición
Límites

4. MOTORES PRIMARIOS Y COMBUSTIBLES PREINDUSTRIALES

Motores primarios
Fuerza humana y animal
Energía hidráulica
Energía eólica

Combustibles de biomasa
Madera y carbón vegetal
Residuos de cultivo y estiércol

Consumo doméstico
Preparación de la comida
Calor y luz

Transporte y construcción
Transporte terrestre
Barcos de remos y veleros
Edificios y estructuras

Metalurgia
Metales no ferrosos

Hierro y acero

Guerra

Energía humana y animal

Explosivos y armas

5. COMBUSTIBLES FÓSILES, ELECTRICIDAD PRIMARIA Y ENERGÍAS RENOVABLES

La gran transición

Los inicios y la expansión de la extracción de carbón

Del carbón vegetal al coque

Máquinas de vapor

Petróleo y motores de combustión interna

Electricidad

Innovaciones técnicas

Tipos de carbón

Hidrocarburos

Electricidad

Energías renovables

Motores primarios en el transporte

6. CIVILIZACIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES

Una potencia sin precedentes

La energía en la agricultura

Industrialización

Transporte

Información y comunicación

Crecimiento económico

Consecuencias y preocupaciones

Urbanización

Calidad de vida
Implicaciones políticas
Armas y guerras
Cambios medioambientales

7. LA ENERGÍA EN LA HISTORIA DEL MUNDO

Grandes patrones de consumo energético
Eras energéticas y transiciones
Tendencias a largo plazo y costes decrecientes
¿Qué no ha cambiado?

Entre determinismo y elección
Imperativos de los requisitos y usos de la energía
La importancia de los mecanismos de control
Los límites de las explicaciones energéticas

ADENDAS

BIBLIOGRAFÍA

1

ENERGÍA Y SOCIEDAD

La energía es la única moneda de cambio universal: sin transformación de energía no hay nada —nada de nada; *niet*—. La rotación de las galaxias y las reacciones termonucleares en el seno de las estrellas son dos manifestaciones universales de transformación de energía. En la Tierra, la transformación de energía abarca desde la fuerza de la tectónica de placas, que separa los fondos oceánicos y crea cadenas montañosas, hasta el impacto erosivo acumulativo de minúsculas gotas de lluvia (como decían los romanos, *gutta cavat lapidem non vi, sed saepe cadendo*: «una gota de agua no perfora la piedra por la fuerza, sino por repetición»). La vida en la Tierra —que, a pesar de nuestros esfuerzos por captar señales extraterrestres que tengan algún tipo de sentido, sigue siendo la única vida que conocemos en el universo— sería imposible sin la conversión fotosintética de la energía solar en fitomasa (biomasa vegetal). Los humanos dependen de este tipo de transformación para su supervivencia —y de muchos otros flujos de energía para su existencia civilizada—. Como dijo Richard Adams (1982, 27):

> Podemos pensar millones de cosas, pero, si no tenemos los medios para convertir esas cosas en acciones, seguirán siendo meros pensamientos. [...] La historia actúa de manera impredecible. Sin

embargo, los eventos históricos toman necesariamente una estructura acorde con sus componentes energéticos.

La evolución de las sociedades humanas ha generado un importante crecimiento poblacional, sistemas sociales cada vez más complejos y mayor calidad de vida para cada vez más personas. Desde una perspectiva biofísica básica, tanto la evolución humana prehistórica como el curso de la historia pueden pensarse como la búsqueda por controlar mayores reservas y flujos de formas de energía cada vez más concentradas y versátiles, y por convertirlas en calor, luz y movimiento de manera cada vez más asequible y eficiente y menos costosa. Esta tendencia ha sido modelizada por la ley de la máxima energía del matemático, químico y estadista estadounidense Alfred Lotka (1880-1949): «Mientras exista materia y energía disponible (sin utilizar), la selección natural operará en todo momento para aumentar la masa total del sistema orgánico, la velocidad de circulación de la materia a través del sistema y el flujo de energía total que circula a través del mismo» (Lotka, 1922: 148).

La historia de las civilizaciones —los organismos más grandes y complejos de la biosfera— ha seguido este curso. La dependencia humana respecto a flujos de energía cada vez más importantes puede pensarse como una continuación inevitable de la evolución orgánica. Wilhelm Ostwald (1853-1932, ganador del Premio Nobel de Química de 1909 por su trabajo sobre la catálisis) fue el primer científico que de manera explícita extendió «la segunda ley de la energía [termodinámica] a todas y cada una de las acciones del universo y, en particular, a todas las acciones humanas». Y sigue: «No todas las energías están listas para esta transformación; solo ciertas formas, conocidas como energías libres. [...] Esto significa que la energía libre es el capital consumido por todas las criaturas de todo tipo, y que su conversión explica todo lo que ocurre» (Ostwald, 1912: 83). Esta observación lo condujo a formular su imperativo energético:

«*Vergeude keine Energie, verwerte sie*». Es decir: «No desperdicies ninguna energía, utilízala» (Ostwald, 1912: 85).

Tres citas ilustran cómo los seguidores de Ostwald han reafirmado sus conclusiones y en algunos casos han hecho que el vínculo entre energía y actividad humana sea aún más explícitamente determinista. A principios de la década de 1970, Howard Odum (1924-2002) introdujo una variación sobre el tema clave de Ostwald: «La disponibilidad de fuentes de energía determina la cantidad de trabajo que puede existir y el control de los flujos de energía determina las relaciones de poder entre los seres humanos y para con la naturaleza» (Odum, 1971: 43). A finales de la década de 1980, Ronald Fox, en las conclusiones de un libro sobre el papel de la energía en la evolución, señaló que «cada mejora de la gestión de los flujos de energía ha provocado una mejora de los mecanismos culturales» (Fox, 1988: 166).

No es necesario ser un gran especialista para constatar el vínculo entre el suministro de energía y el progreso social. Esto es lo que escribió Eric Blair (George Orwell, 1903-1950) en 1937 en el segundo capítulo de *El camino a Wigan Pier*, después de una visita a una mina de carbón subterránea:

> Según Chesterton, la dependencia de nuestra civilización respecto al carbón es más completa de lo que cabe imaginar espontáneamente. Todas las máquinas que nos mantienen vivos (así como las máquinas que fabrican máquinas) dependen directa o indirectamente del carbón. En el metabolismo del mundo occidental, solo el hombre que ara la tierra es más importante que el minero de carbón. Este es una suerte de cariátide sobre cuyos hombros reposa casi todo lo que no es mugriento. Por eso vale la pena observar por uno mismo el proceso de extracción de carbón si se tiene la oportunidad de hacerlo y se está dispuesto a tomarse la molestia. (Orwell 1937, 18)

Sin embargo, reafirmar este vínculo fundamental (como hizo Orwell) y afirmar que el progreso cultural siempre ha ido de la mano del progreso en el control de los flujos de energía (como hace Fox) son dos cosas distintas. La conclusión orwelliana es inatacable. En cambio, el enunciado de Fox es una clara reafirmación de la visión determinista que se desprende de la primera ley del desarrollo cultural propuesta por la antropóloga Leslie White (1900-1975) en la década de 1940: «En igualdad de circunstancias, el grado de desarrollo cultural es una función de la cantidad de energía aprovechada por persona y año» (White, 1943: 346). Mientras que la formulación de Ostwald y el efecto general de la energía sobre la estructura y la dinámica de las sociedades que describe Orwell no son verdaderamente discutibles, la existencia de un vínculo determinista entre el nivel de consumo de energía y el progreso cultural sí que lo es. En el último capítulo del libro examino esta correlación (o su ausencia).

La naturaleza fundamental del concepto «energía» no está en cuestión. Como dijo Robert Lind (1975: 2):

> Si pudiéramos hallar una palabra que representara una idea que se aplicara a cada elemento de nuestra existencia de tal manera que sintiéramos que tenemos una comprensión genuina de la misma, habríamos logrado algo económico e importante. Esto es lo que ha sucedido con la idea expresada por la palabra *energía*. Ningún otro concepto ha unificado tanto nuestra comprensión de todo lo que es.

Pero ¿qué es la energía? Sorprendentemente, incluso los ganadores del Premio Nobel tienen importantes dificultades para ofrecer una respuesta satisfactoria a una pregunta aparentemente sencilla. En sus famosas *Lecciones de física*, Richard Feynman (1918-1988) reconoce que «la física actual no sabe claramente qué es la energía. No tenemos

ninguna foto que nos muestre que la energía se desplaza en pequeñas burbujas de un tamaño determinado» (Feynman, 1988: 4-2).

Lo que sí sabemos es que toda la materia es energía en reposo, que la energía se manifiesta de múltiples formas y que todas las formas de energía están unidas entre sí por numerosas conversiones, muchas de ellas universales, omnipresentes y constantes, y otras altamente localizadas, esporádicas y efímeras (figura 1.1). La comprensión de estos potenciales, reservas y transformaciones se expandió y sistematizó fundamentalmente durante el siglo XIX y se perfeccionó durante el siglo XX, cuando —hecho que refleja la complejidad de las transformaciones de energía— entendimos cómo liberar energía nuclear antes (teóricamente a finales de la década de 1930 y en la práctica en 1943, cuando el primer reactor nuclear comenzó a funcionar) de comprender cómo funciona la fotosíntesis (cuyas secuencias solo se revelaron durante la década de 1950).

	Electro-magnética	Química	Nuclear	Térmica	Cinética	Eléctrica
Electro-magnética		Quimioluminiscencia	Bombas nucleares	Radiación térmica	Aceleración de las cargas	Electro-magnética
Química	Fotosíntesis	Procesamiento químico		Ebullición	Disociación por radiólisis	Electrólisis
Nuclear	Reacción gamma-neutrónica					
Térmica	Absorción solar	Combustión	Fisión | Fusión	Intercambio de calor	Fricción	Calentamiento por resistencia
Cinética	Radiómetro	Metabolismo	Radioactividad | Bombas nucleares	Expansión térmica | Combustión interna	Engranajes	Motores eléctricos
Eléctrica	Paneles solares	Pila de combustible | Batería	Batería nuclear	Termoelectricidad	Generadores de electricidad	

Figura 1.1 Matriz de conversiones de energía. Cuando existen diversas posibilidades, solo se identifican dos transformaciones especialmente importantes.

FLUJOS, RESERVAS Y CONTROLES

Todas las formas conocidas de energía son críticas para la existencia humana. Esta realidad excluye cualquier tipo de clasificación por importancia. En buena medida, el curso de la historia se ha visto determinado y circunscrito tanto por flujos de energía universales y planetarios como por sus manifestaciones locales o regionales. Las características fundamentales del universo dependen de la energía gravitacional, que ordena incontables galaxias y sistemas estelares. La gravedad también mantiene nuestro planeta a la distancia adecuada

del Sol y genera una atmósfera suficientemente masiva para que la Tierra sea habitable (recuadro 1.1).

Como en cualquier estrella activa, la fusión alimenta al Sol y el producto de dicha reacción termonuclear llega a la Tierra en forma de energía electromagnética. Su flujo se extiende en un amplio espectro de longitudes de onda, incluida la luz visible. Cerca del 30% de este enorme flujo es reflejado por las nubes y la superficie, cerca del 20% es absorbido por la atmósfera y las nubes, y el resto —aproximadamente la mitad del total— es absorbido por los océanos y los continentes, se convierte en energía térmica y vuelve después al espacio (Smil, 2008a). La energía geotérmica de la Tierra genera un flujo de calor mucho más pequeño: resulta de la acumulación gravitatoria original de la masa planetaria y la descomposición de la materia radiactiva e impulsa grandes procesos tectónicos que siguen reordenando océanos y continentes y causan erupciones volcánicas y terremotos.

RECUADRO 1.1

Gravedad y habitabilidad de la Tierra

La tolerancia límite de los metabolismos basados en el carbono viene determinada por el punto de congelación del agua, cuya forma líquida es necesaria para la formación de moléculas orgánicas y sus reacciones (límite inferior), y por las temperaturas y presiones que desestabilizan los aminoácidos y descomponen las proteínas (límite superior). La zona habitable de la Tierra —región orbital que garantiza condiciones óptimas para que un planeta albergue vida— es muy estrecha (Perkins, 2013). Un cálculo reciente concluye que estamos todavía más cerca del límite de lo que pensábamos antes: Kopparapu *et al.* (2014) explican que, dada su composición y presión atmosférica, la Tierra orbita en el borde interior de la zona habitable, justo fuera del radio donde un efecto invernadero desbocado generaría temperaturas intolerablemente altas.

Hace aproximadamente dos mil millones de años, el océano, las arqueas y las algas secuestraron suficiente dióxido de carbono como para evitar este

efecto en la Tierra. Si el planeta hubiera estado un 1% más alejado del Sol, casi toda su agua estaría encerrada en glaciares. Incluso con temperaturas incluidas dentro de una franja óptima, el planeta no hubiera podido soportar una vida altamente diversificada sin su singular atmósfera, mayoritariamente formada por nitrógeno, enriquecida por el oxígeno proveniente de la fotosíntesis y con una serie de importantes gases traza que regulan la temperatura de la superficie. Por último, este delgado envoltorio gaseoso no podría haber persistido si el planeta no hubiera sido lo suficientemente grande como para ejercer la gravedad adecuada para mantener la atmósfera en su lugar.

Solo una pequeña parte de la energía radiante entrante (menos del 0,05%) se transforma mediante fotosíntesis en nuevas reservas de energía química en forma de plantas, que proporcionan la base de cualquier forma de vida superior. El metabolismo reorganiza los nutrientes en tejidos en crecimiento y mantiene las funciones corporales y la temperatura constante en todas las especies superiores. La digestión también genera la energía mecánica (cinética) de los músculos. La transformación de energía en los animales está inherentemente limitada por el tamaño de los cuerpos y la disponibilidad de alimento. Una característica distintiva fundamental de nuestra especie ha sido la extensión de estos límites físicos mediante el uso más eficiente de los músculos y el aprovechamiento de energía exterior a nuestro propio cuerpo.

Esta energía extracorporal ha sido progresivamente desbloqueada por el intelecto humano y utilizada para un número creciente de tareas en forma de motores primarios más potentes y combustibles (cuya combustión libera calor). Los detonantes del suministro de energía dependen del flujo de información y de una enorme variedad de artefactos. Estos dispositivos han abarcado desde herramientas tan sencillas como piedras y palancas hasta complejos motores de combustión y reactores de fisión nuclear. La secuencia evolutiva e histórica básica de estos avances es fácil de describir en términos cualitativos amplios. Como ocurre con cualquier organismo no fotosintetizante, el principal requisito energético del ser humano es la

alimentación. La caza y recolección de los homínidos se parecieron mucho a las prácticas de adquisición de alimentos de sus antepasados primates. Aunque algunos primates —así como otros mamíferos (como las nutrias y los elefantes), algunas aves (cuervos y loros) e incluso algunos invertebrados (cefalópodos)— han desarrollado un pequeño repertorio de herramientas rudimentarias (Hansell, 2005; Sanz, Call y Boesch, 2014; figura 1.2), solo los homínidos han hecho de la fabricación de herramientas una marca distintiva de su comportamiento.

Figura 1.2 Un chimpancé (*Pan troglodytes*) en Gabón abre nueces con una herramienta (Corbis).

Las herramientas nos han otorgado una ventaja mecánica a la hora de adquirir alimento, cobijo y ropa. El dominio del fuego amplió muchísimo nuestro rango de asentamiento y nos distanció aún más de los animales. Nuevas herramientas condujeron al uso de animales domesticados, la construcción de máquinas más complejas

alimentadas por músculos humanos y animales, y la conversión de una pequeña fracción de la energía cinética del viento y el agua en energía útil. Estos nuevos motores primarios multiplicaron la energía que éramos capaces de controlar, aunque durante mucho tiempo su uso estuvo circunscrito por la naturaleza y magnitud de los flujos capturados. El caso más evidente es el de las velas, antiguas y eficaces herramientas cuya capacidad estuvo restringida durante milenios por los flujos de viento y las corrientes oceánicas. Estos grandes flujos dirigieron los viajes transatlánticos europeos de finales del siglo XV hacia el Caribe. También impidieron que los españoles descubrieran Hawái, a pesar de que los barcos mercantes españoles —conocidos como galeones de Manila— cruzaron el Pacífico una o dos veces al año desde México (Acapulco) hasta Filipinas durante 250 años, entre 1565 y 1815 (Schurz, 1939).

La combustión controlada en chimeneas, estufas y hornos convirtió la energía química de las plantas en energía térmica. Este calor se utilizó directamente en los hogares y también para fundir metales, cocer ladrillos y procesar y perfeccionar innumerables productos. El uso de combustibles fósiles hizo más habituales y eficientes todos estos usos directos tradicionales del calor. Gracias a una serie de inventos cruciales, pudimos convertir la energía térmica de la quema de combustibles fósiles en energía mecánica (primero en motores de vapor y de combustión interna y más adelante en turbinas de gas y cohetes). Desde 1882 hemos generado electricidad mediante la quema de combustibles fósiles y el aprovechamiento de la energía cinética del agua y desde 1956 mediante la fisión de un isótopo de uranio.

La quema de combustibles fósiles y la generación de electricidad crearon un nuevo tipo de civilización energívora que hoy abarca todo el planeta y cuyas fuentes de energía primaria incluyen una pequeña pero rápidamente creciente proporción de nuevas fuentes renovables, especialmente la energía solar (aprovechada mediante dispositivos fotovoltaicos o en centrales de energía termosolar de concentración) y

la eólica (obtenida mediante grandes turbinas eólicas). A su vez, estos avances se han basado en una concatenación de acontecimientos anteriores. Por utilizar una analogía con los modelos de flujos: para liberar el flujo de la creatividad humana tuvieron que configurarse y activarse primero un conjunto de compuertas o válvulas en el orden adecuado.

Las principales compuertas que deben configurarse y activarse para liberar grandes potenciales energéticos son el acceso a la educación, un sistema jurídico estable y predecible, un sistema económico transparente, la disponibilidad de capital suficiente y condiciones adecuadas para la investigación fundamental. Por consiguiente, no es sorprendente que el crecimiento cuantitativo y la mejora cualitativa de los flujos de energía existentes —así como la difusión de fuentes de energía completamente nuevas— a menudo requiera varias generaciones. La cronología, la capacidad global y la composición de los flujos de energía que resultan de todos estos cambios son extremadamente difíciles de predecir. E incluso cuando dichas transiciones se ponen en marcha, es imposible evaluar el impacto que un cambio de motor primario o combustible tendrá en la agricultura, la industria, el transporte, las urbes, la guerra o el medio ambiente. El análisis cuantitativo es esencial para comprender nuestros límites y éxitos y requiere conocer conceptos y medidas científicos básicos.

CONCEPTOS Y MEDIDAS

Toda conversión de energía viene determinada por unos pocos principios esenciales. Cualquier energía puede convertirse en calor (energía térmica). La energía nunca se pierde. La conservación de la energía, la primera ley de la termodinámica, es una realidad universal fundamental. A lo largo de las cadenas de conversión, el potencial de trabajo útil disminuye constantemente (recuadro 1.2). Esta realidad inexorable constituye la segunda ley de la termodinámica, que define la entropía como la medida asociada con esta pérdida de energía útil.

En otras palabras, aunque el contenido energético del universo es constante, las conversiones de energía aumentan su entropía y, por tanto, disminuyen su utilidad. Una cesta de cereales o un barril de crudo son depósitos de energía de baja entropía capaces de generar mucho trabajo útil una vez metabolizados o quemados, pero terminarán por convertirse en movimiento aleatorio de moléculas de aire ligeramente calentadas, estado altamente entrópico e irreversible que representa una pérdida irrecuperable de utilidad.

La disipación entrópica unidireccional conduce a una menor complejidad y un mayor desorden y homogeneidad en cualquier sistema cerrado. Sin embargo, todo organismo vivo —desde una diminuta bacteria hasta una civilización global— desafía temporalmente esta tendencia importando y metabolizando energía exterior. Esto significa que un organismo vivo es un sistema abierto capaz de mantener un flujo continuo de entrada y salida de energía y materia con el entorno. Mientras estén vivos, estos sistemas no pueden estar en un estado de equilibrio químico y termodinámico (Prigogine, 1947, 1961; Von Bertalanffy, 1968; Haynie, 2001). Su neguentropía —su crecimiento, renovación y evolución— genera como resultado una mayor heterogeneidad y una creciente complejidad estructural y sistémica. Igual que ocurre con muchos otros avances científicos, no obtuvimos una comprensión clara y coherente de este fenómeno hasta el siglo XIX, cuando la física, la química y la biología se preocuparon por estudiar las transformaciones de energía al mismo tiempo (Atwater y Langworthy, 1897; Cardwell, 1971; Lindsay, 1975; Müller, 2007; Oliveira, 2014; Varvoglis, 2014).

RECUADRO 1.2

Utilidad decreciente de la energía convertida

Cualquier forma de conversión de energía sirve para ilustrar este principio. Supongamos que un lector usa luz eléctrica para iluminar esta página. La

energía electromagnética de la luz representa una pequeña parte de la energía química contenida en la masa de carbón utilizada para generarla (en 2015 se utilizaba carbón para producir el 33% de la electricidad generada en Estados Unidos). Al menos el 60% de la energía del carbón se transforma en calor en la propia planta de energía termoeléctrica donde es quemado. Si el lector utiliza una bombilla incandescente, más del 95% de la electricidad entregada se transforma en calor porque el metal del filamento de la bombilla ofrece resistencia a la corriente eléctrica. La luz que llega a la página es absorbida o reflejada y absorbida por su entorno para finalmente irradiarse como calor. Al final del proceso, la energía química del carbón —que se hallaba en estado de baja entropía— se ha transformado en calor difuso, altamente entrópico y apenas perceptible, repartido entre la planta de energía termoeléctrica, los cables eléctricos, la bombilla, la página del libro y el entorno. No se ha perdido ninguna energía, pero una forma de energía muy útil ha sido degradada hasta el punto de no tener ninguna utilidad práctica.

En aquel momento surgió la necesidad de disponer de medidas estándar. Dos unidades de medición de *energía* se volvieron comunes: la caloría (una unidad métrica) y la unidad térmica británica (BTU, por sus siglas en inglés). Actualmente la unidad energética básica es el joule o julio. Debe su nombre al físico inglés James Prescott Joule (1818-1889), que publicó el primer cálculo preciso de equivalencia entre trabajo y calor (recuadro 1.3). La *potencia* es la tasa de un flujo de energía. Su primera unidad estándar, el caballo de fuerza, fue establecida por James Watt (1736-1819). Quería que el valor de sus máquinas de vapor resultara fácil de entender, por lo que eligió compararlas con el motor primario que tenían que reemplazar, esto es, un caballo de tiro que generalmente hacía funcionar un molino o una bomba de agua (figura 1.3, recuadro 1.3).

Otro concepto importante es el de *densidad de energía*, la cantidad de energía por unidad de masa de un recurso dado (recuadro 1.4). Esta medida es una característica fundamental de los alimentos: incluso cuando abundan, los alimentos con una baja densidad de energía no pueden convertirse en alimentos básicos. Los habitantes prehispánicos del golfo de México, por ejemplo, comían muchos higos

chumbos porque crecían en todas las especies de cactus del género *Opuntia* y, por tanto, resultaban fáciles de recolectar (Sanders, Parsons y Santley, 1979). Sin embargo, como ocurre con muchas frutas, la pulpa del higo chumbo está compuesta sobre todo de agua (cerca del 88%), contiene menos del 10% de carbohidratos, un 2% de proteínas y un 0,5% de lípidos, y tiene una densidad de energía de solo 1,7 MJ/kg (Feugang *et al*., 2006). Esto significa que incluso una mujer pequeña que quisiera sobrevivir a base de carbohidratos de higo chumbo (suponiendo, de manera poco realista, que no necesitara obtener los otros dos macronutrientes) tendría que comer 5 kg de esta fruta todos los días, mientras que podría obtener la misma cantidad de energía con solo 650 g de maíz molido consumido en forma de tortillas o tamales.

RECUADRO 1.3

Medir energía y potencia

Oficialmente, un julio se define como la cantidad de trabajo realizado por una fuerza constante de 1 newton aplicada a lo largo de 1 m de longitud. Una unidad básica de energía también puede definirse como un requisito de calor. La definición oficial de una caloría es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 cm^3 de agua en 1 °C. Es una cantidad de energía pequeña. Hacer lo mismo con 1 kg de agua requiere mil veces más energía, es decir, una kilocaloría (el anexo «Medidas básicas» contiene una lista completa de prefijos multiplicadores). Dada la equivalencia entre calor y trabajo, todo lo que se requiere para convertir calorías en julios es recordar que una caloría equivale aproximadamente a 4,2 J. La conversión a BTU también es muy sencilla. 1 BTU contiene cerca de 1.000 J (exactamente 1.055). Un buen baremo comparativo es la ingesta diaria media de alimentos. Para un adulto moderadamente activo es de 2-2,7 Mcal o 8-11 MJ (y 1 kg de pan integral suministra 10 MJ).

En 1782, James Watt calculó que un caballo de molino trabajaba a una velocidad de 32.400 pie-libras/minuto —al año siguiente redondeó el cálculo a 33.000— (Dickinson, 1939). Supuso una velocidad promedio de unos 3 pies/segundo, pero no sabemos por qué fijó la capacidad media de tiro en cerca

de 180 libras. Algunos animales especialmente fuertes podían alcanzar tal capacidad, pero en la Europa del siglo XVIII la mayoría de caballos no podían sostener un ritmo de trabajo de un caballo de fuerza. La unidad de potencia estándar actual, el vatio, es igual a un flujo de un julio por segundo. Un caballo de potencia equivale a cerca de 750 W (exactamente 745,699). El consumo diario de 8 MJ de alimento corresponde a una potencia de 90 W (8 MJ / 24 h × 33 3.600 s), menos que una bombilla estándar (100 W). Una tostadora doble necesita 1.000 W (1 kW); los coches pequeños entregan alrededor de 50 kW; una central grande de carbón o energía nuclear produce electricidad a un ritmo de 2 GW.

La *densidad de potencia* es la tasa a la que se produce o consume energía por unidad de área y, por consiguiente, es un determinante estructural crítico de cualquier sistema de energía (Smil, 2015b). El tamaño de las ciudades en las sociedades tradicionales, por ejemplo, dependía de la leña, y el carbón vegetal estaba claramente limitado por la densidad de potencia inherentemente baja de la producción de fitomasa (recuadro 1.5, figura 1.4). La densidad de potencia del crecimiento anual sostenible de los árboles en climas templados es igual (como máximo) al 2% de la densidad de potencia del consumo de energía urbano tradicional de calefacción, cocina y manufactura. Por consiguiente, las ciudades tuvieron que utilizar áreas cercanas de al menos 50 veces su tamaño para el suministro de combustible. Esta situación limitó su crecimiento incluso cuando otros recursos, como la comida y el agua, eran suficientes.

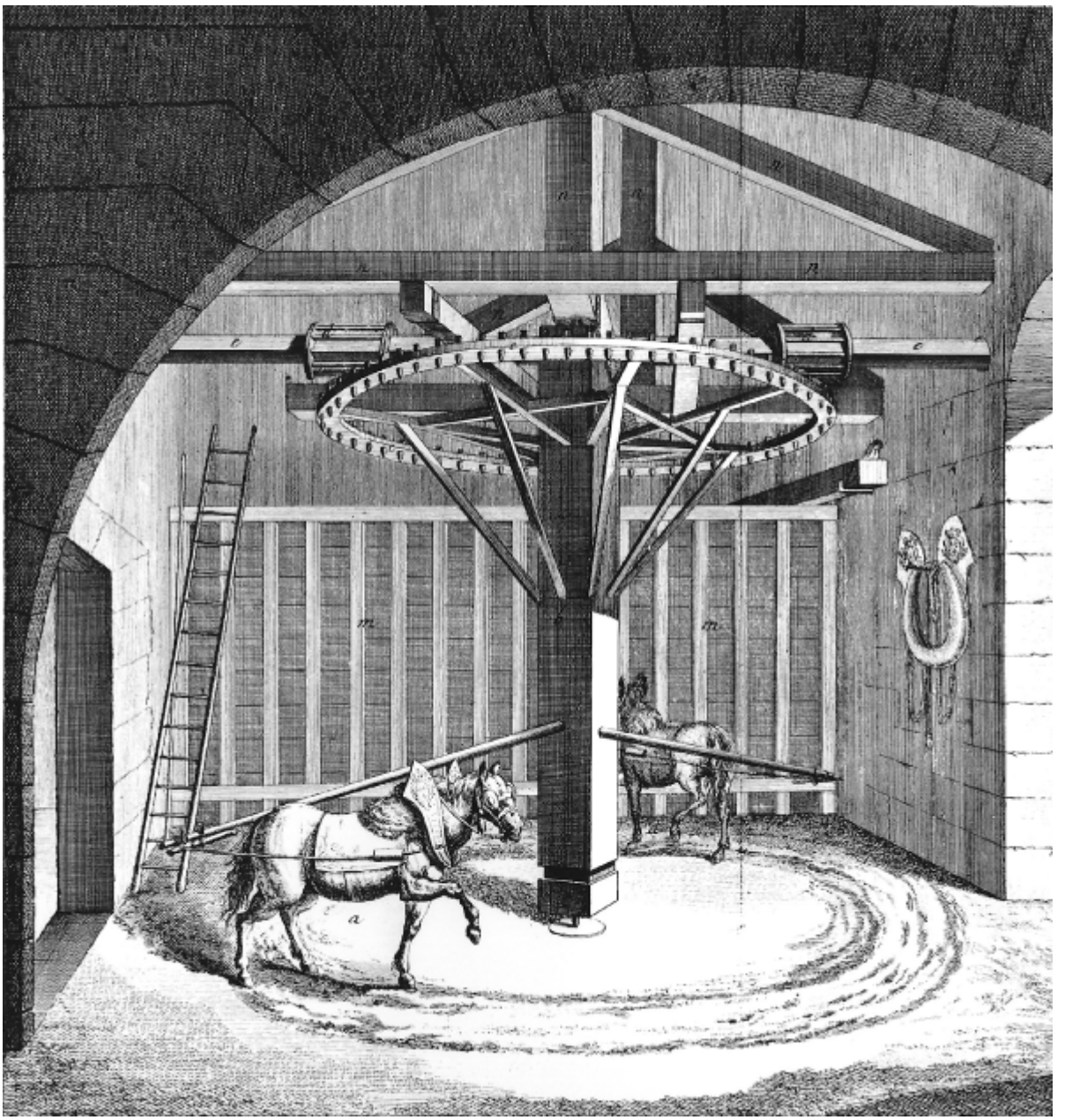


Figura 1.3 Dos caballos hacen girar el cabrestante de una bomba de agua de pozo en una fábrica francesa de alfombras de mediados del siglo XVIII (fuente: *Enciclopedia* [Diderot y D'Alembert 1769-1772]). Un caballo medio de la época no podía mantener una tasa de trabajo estable de un caballo de potencia. James Watt exageró la cantidad de caballos de potencia de sus máquinas de vapor para garantizar la satisfacción de los clientes que reemplazaban a los animales uncidos.

RECUADRO 1.4

Densidad de energía de alimentos y combustibles

Clasificación	Ejemplos	Densidad de energía (MJ/kg)
Alimentos		
Muy baja	Verduras, frutas	0,8-2,5
Baja	Tubérculos, leche	2,5-5,0
Media	Carne	5,0-12,0
Alta	Cereales y leguminosas	12,0-15,0
Muy alta	Aceites, grasas animales	25,0-35,0
Combustibles		
Muy baja	Turba, madera verde, hierba	5,0-10,0
Baja	Residuos de cultivo, madera secada al aire libre	12,0-15,0
Media	Madera seca	17,0-21,0
	Carbón bituminoso	18,0-25,0
Alta	Carbón vegetal, antracita	28,0-32,0
Muy alta	Petróleo crudo	40,0-44,0

Fuentes: Watt (1973), Jenkins (1993) y USDA (2011).

Una tasa que ha adquirido mayor importancia con el avance de la industrialización es la *eficiencia de las conversiones de energía*. Se trata de una relación de salida/entrada (*output/input*) que describe el rendimiento de los convertidores de energía (estufas, motores y luces). Aunque no podemos evitar la disipación entrópica, podemos reducir la cantidad de energía necesaria para realizar ciertas tareas y de este modo mejorar la eficiencia de las conversiones (recuadro 1.6). A pesar de que estas mejoras siempre estarán limitadas por factores mecánicos

y termodinámicos fundamentales, en los últimos años hemos llevado algunos procesos muy cerca de los límites prácticos de eficiencia, aunque en muchos otros casos —incluidos convertidores de energía tan comunes como el motor de combustión interna o la luz— queda mucho por hacer.

RECUADRO 1.5

Densidad de potencia de los combustibles de fitomasa

La fotosíntesis transforma menos del 0,5% de la radiación solar en nueva fitomasa. Las productividades anuales más altas de leña de especies tradicionales de crecimiento rápido (álamo, eucalipto, pino) nunca han superado las 10 t/ha y en regiones más secas siempre se han situado entre 5 y 10 t/ha (Smil, 2015b). La densidad de energía media de la madera seca es de 18 GJ/t, de forma que una cosecha de 10 t/ha equivaldría a una densidad de potencia de 0,6 W/m^2: (10 t/ha × 18 GJ) / 3,15 × 107 (segundos en un año) = ~ 5.708 W; 5.708 W / 10.000 m^2 (ha) = ~ 0,6 W/m^2. Una ciudad grande del siglo XVIII requería al menos 20-30 W/m^2 de área construida para calefacción, cocina y manufactura artesanal, y su leña tenía que provenir de un área 30-50 veces mayor que su superficie.

Las ciudades requerían mucho carbón vegetal —era el único combustible preindustrial no fumígeno y, por tanto, era muy codiciado para la calefacción de interiores en todas las sociedades tradicionales—, que implicaba una pérdida sustancial de energía adicional. A mediados del siglo XVIII la proporción típica entre carbón vegetal y madera era de 1:5, de tal manera que la eficiencia de esta conversión (con madera seca a 18 GJ/t y carbón [carbono prácticamente puro] a 29 GJ/t) era del 30% (5 × 18 / 29 = 0,32), mientras que la densidad de potencia de las cosechas de madera destinadas a la producción de carbón vegetal era de solo 0,2 W/m^2. Esto significa que las grandes ciudades preindustriales ubicadas en un clima templado septentrional y muy dependientes del carbón vegetal (como Xi'an o Pekín, en China) habrían requerido un área boscosa al menos 100 veces mayor que su tamaño para garantizar un suministro continuo de combustible.

Figura 1.4 Proceso de carboneo en la Inglaterra de principios del siglo XVII representado en *Silva*, de John Evelyn (1607).

RECUADRO 1.6

Mejoras de eficiencia y paradoja de Jevons

El progreso técnico ha traído consigo numerosas e impresionantes mejoras de eficiencia y la historia de la iluminación es un magnífico ejemplo de ello (Nordhaus, 1998; Fouquet y Pearson, 2006). Las velas solo convierten el 0,01% de la energía química del sebo o la cera en luz. En la década de 1880, las bombillas de Edison eran diez veces más eficientes. En 1900, las centrales eléctricas de carbón tenían una eficiencia del 10% y las bombillas convertían no más del 1% de la electricidad en luz y, por tanto, el 0,1% de la energía química del carbón se transformaba en luz (Smil, 2005). Las mejores centrales de ciclo combinado actuales —que usan gas caliente proveniente de una turbina de gas para producir vapor que alimenta una turbina de vapor— tienen una eficiencia cercana al 60%, mientras que las luces fluorescentes y los diodos emisores de luz —más conocidos como LED, por sus siglas en inglés— tienen eficiencias de hasta el 15% (USDOE, 2013). Esto significa que cerca del 9% de la energía del gas natural se convierte en luz, lo cual supone una mejora

de eficiencia del 9.000% desde la década de 1880. Este tipo de mejora ahorra capital y gastos de funcionamiento y reduce el impacto ambiental del sistema.

Sin embargo, la mejora de la eficiencia de conversión no necesariamente desemboca en un ahorro real de energía. En 1865, el economista inglés Stanley Jevons (1835-1882) señaló que la adopción de máquinas de vapor más eficientes había generado un gran incremento en el consumo de carbón y concluyó: «Sería una equivocación suponer que el uso más eficiente de un combustible suscita una reducción del consumo. En realidad, ocurre lo contrario. Los nuevos modelos económicos suelen generar un aumento del consumo. Tenemos muchos ejemplos de ello» (Jevons, 1865: 140). Este principio ha sido confirmado por muchos estudios posteriores (Herring, 2004, 2006; Polimeni *et al*., 2008), aunque en los países ricos —cuyo consumo de energía per cápita está cerca del nivel de saturación— el efecto ha ido debilitándose.

Cuando se calcula la eficiencia de la producción de alimentos (energía de los alimentos/energía de los recursos para conseguirlos), combustibles o electricidad suele emplearse la expresión *retorno de energía*. El retorno de la agricultura tradicional —que utilizaba solo mano de obra humana o animal— tenía que ser claramente superior a uno: la cosecha (comestible) tenía que contener más energía que el alimento y pienso consumidos por las personas y los animales que producían los cultivos (y todos los que dependían de ellos).

Comparar el retorno de energía de la agricultura tradicional y moderna es un ejercicio complicado. La agricultura tradicional únicamente utilizaba energía humana y animal (e implicaba tan solo radiación solar transformada recientemente), mientras que la agricultura moderna está «dopada» por combustibles, fertilizantes, pesticidas y maquinaria agrícola. Por eso su retorno energético siempre será inferior al de un cultivo tradicional (recuadro 1.7).

Finalmente, la *intensidad energética* mide el coste de un producto, un servicio o una economía entera en unidades de energía estándar. Entre los materiales de uso común, el aluminio y los plásticos son muy intensivos en energía, el vidrio y el papel lo son relativamente poco y,

si excluimos su coste fotosintético, la madera es el material menos intensivo en energía (recuadro 1.8). El progreso técnico de los últimos dos siglos ha mejorado mucho la intensidad energética de muchos procesos. El caso más destacado es el de la fundición de arrabio a base de coque en grandes altos hornos, que hoy requiere menos del 10% de energía por unidad de masa de metal caliente que la producción preindustrial de arrabio a base de carbón (Smil, 2016).

RECUADRO 1.7

Comparación de retornos de energía en la producción de alimentos

Desde la década de 1970 se utiliza el argumento del retorno de energía para defender que la agricultura tradicional es mejor que la moderna. Pero se trata de una comparación engañosa —o que, como mínimo, silencia una diferencia fundamental entre sendos retornos—. El retorno de la agricultura tradicional es un simple cociente entre la energía de los alimentos cosechados y la energía necesaria para producir la cosecha (esencialmente trabajo humano y animal). En la agricultura moderna, el denominador de la ecuación se compone sobre todo de combustibles fósiles no renovables utilizados para fabricar máquinas y productos químicos agrícolas e impulsar la maquinaria, mientras que el componente trabajo es prácticamente insignificante.

Si medimos el cociente entre energía comestible producida y trabajo, la agricultura moderna es muy superior a cualquier práctica tradicional porque no utiliza animales y emplea muy poca mano de obra humana. Si incluimos los combustibles fósiles y la electricidad en el coste de producción del cultivo moderno, entonces su retorno es muy inferior al de los sistemas tradicionales.

Este cálculo es posible porque existe una equivalencia física entre energías: tanto los alimentos como los combustibles pueden expresarse en unidades idénticas. Sin embargo, persiste un problema obvio de inconmensurabilidad o «peras y olmos»: no existe una forma del todo satisfactoria de comparar el retorno de sistemas que dependen de tipos de energía tan diferentes.

RECUADRO 1.8

Intensidad energética de materiales comunes

Material	Coste energético (MJ/kg)	Proceso
Aluminio	175-200	Metal de bauxita
Ladrillo	1-2	Cocido a partir de arcilla
Cemento	2-5	A partir de materias primas
Cobre	90-100	A partir del mineral
Explosivos	10-70	A partir de materias primas
Vidrio	4-10	A partir de materias primas
Gravilla	<1	Excavado
Hierro	12-20	A partir de mineral de hierro
Madera	1-3	A partir de árboles
Papel	23-35	A partir de árboles
Plásticos	60-120	A partir de hidrocarburos
Contrachapado	3-7	A partir de árboles
Arena	<1	Excavado
Acero	20-25	A partir de arrabio
Acero	10-12	A partir de chatarra
Piedra	<1	Cantera

Fuente: Smil, 2014b.

El coste energético de la energía (a menudo llamado EROI por sus siglas en inglés [*Energy Return On Investment*], aunque realmente convendría llamarlo EROEI [*Energy Return on Energy Investment*]), solo es una medida reveladora si se comparan valores calculados con métodos idénticos que utilizan hipótesis estándar y límites analíticos claros. Las sociedades modernas han favorecido el desarrollo de

combustibles fósiles, cuyo retorno energético neto es el más elevado de todos. Este es uno de los motivos por los que hemos favorecido el crudo en general y los campos petrolíferos de Oriente Medio en particular; otras ventajas obvias son la alta densidad energética del petróleo y, por consiguiente, su fácil transportabilidad (recuadro 1.9).

RECUADRO 1.9

Retorno energético de la inversión energética (EROEI)

Existen grandes diferencias de calidad y accesibilidad entre combustibles fósiles de distintos tipos. Un estrato grueso de carbón bituminoso de buena calidad extraíble en una mina a cielo abierto no tiene nada que ver con las delgadas vetas subterráneas de carbón de baja calidad. Del mismo modo, los campos petrolíferos «supergigantes» de Oriente Medio no pueden compararse con los pozos poco productivos que requieren un bombeo constante. Por tanto, el EROEI puede variar sustancialmente en cada caso —y también mejorar con el desarrollo de nuevas técnicas de extracción—. Los siguientes EROEI son un indicador aproximativo de la diferencia que existe entre los distintos métodos de extracción y conversión (Smil, 2008a; Murphy y Hall, 2010). El EROEI de la producción de carbón oscila entre 10 y 80, y el de la producción de petróleo y gas, entre 10 y muy por encima de 100. El EROEI de grandes turbinas eólicas en emplazamientos muy ventosos puede acercarse a 20, aunque generalmente es inferior a 10. El EROEI de las células solares fotovoltaicas no es superior a 2; el de los biocombustibles modernos (etanol, biodiésel) es como máximo de 1,5, aunque no es poco común que su producción implique una pérdida de energía o ninguna ganancia neta (EROEI de 0,9-1).

DIFICULTADES Y ADVERTENCIAS

Utilizar unidades estándar para medir flujos y reservas de energía es físicamente sencillo y científicamente impecable. Sin embargo, el uso de un único denominador común también conlleva dificultades. En particular, no refleja las diferencias cualitativas críticas que existen

entre los tipos de energía. Dos tipos de carbón distintos pueden tener una densidad energética idéntica, pero uno arder limpiamente y producir muy poca ceniza y otro generar mucho humo y residuo incombustible y, además, emitir una gran cantidad de dióxido de azufre. La abundancia de carbón energéticamente muy denso —ideal para alimentar máquinas de vapor— contribuyó de manera decisiva al dominio británico del transporte marítimo en el siglo XIX, ya que ni Francia ni Alemania tenían acceso a grandes cantidades de carbón de calidad comparable.

Las unidades de energía abstractas tampoco diferencian entre biomasa comestible y no comestible. Una misma masa de trigo y paja seca de trigo contienen casi la misma energía térmica, pero la paja, que está mayoritariamente compuesta de celulosa, hemicelulosa y lignina, no puede ser digerida por los humanos, mientras que el trigo, que contiene un 70% de carbohidratos almidonados complejos y hasta un 14% de proteínas, es una excelente fuente de nutrientes básicos. Las unidades de energía abstractas también ocultan el origen específico de la energía alimentaria, que es clave para una nutrición adecuada. Muchos alimentos altamente energéticos no contienen (o casi no contienen) ni proteínas ni lípidos, dos nutrientes necesarios para el crecimiento y el mantenimiento normal del cuerpo, y, además, puede que no proporcionen ningún micronutriente esencial (vitaminas y minerales).

Las medidas abstractas ocultan otras cualidades importantes. La accesibilidad de las reservas de energía es un asunto crítico. La madera del tallo del árbol y la de las ramas tienen la misma densidad de energía, pero en muchas sociedades preindustriales solo se podían recolectar ramas porque no existían ni hachas ni sierras. De hecho, en las regiones más pobres de África y Asia, donde los niños y las mujeres recogen fitomasa leñosa, sigue ocurriendo lo mismo; la forma —y, por tanto, la transportabilidad— también importa, porque después tienen que cargar con la madera a pie y recorrer distancias considerables. Del mismo modo, la facilidad de uso y la eficiencia de conversión pueden

ser decisivas a la hora de elegir un combustible. Una casa puede calentarse con madera, carbón, gasóleo o gas natural, pero las mejoras estufas de gas tienen una eficiencia de hasta el 97% y, por tanto, resultan mucho más baratas que cualquier otra opción.

La quema de paja en una estufa rudimentaria requiere un trabajo continuo, mientras que los grandes troncos de madera pueden quemar durante horas sin necesidad de atención. La cocina de interior sin ventilación (o mal ventilada mediante un agujero en el techo) con estiércol produce mucho más humo que la quema de madera seca en una buena estufa, y, de hecho, la combustión de biomasa en interiores es una causa de enfermedades respiratorias muy importante en muchos países pobres (McGranahan y Murray, 2003; Barnes, 2014). Y, a menos que se especifique su origen, las densidades y los flujos de energía no diferencian entre energías renovables y fósiles, distinción fundamental para comprender la naturaleza y la sostenibilidad de cualquier sistema energético. El mundo moderno se ha basado en la combustión masiva de combustibles fósiles, pero esta práctica se ve claramente limitada por su abundancia en la corteza terrestre, así como por las consecuencias ambientales de la quema de carbón e hidrocarburos, de modo que nuestras sociedades solo podrán garantizar su supervivencia si llevan a cabo una transición hacia fuentes de energía no fósiles.

Si comparamos la eficiencia de conversión de la energía humana y animal con la de la inanimada, surgen nuevas dificultades. En el caso de la energía inanimada, se trata de una mera relación entre aporte de combustible o electricidad y producción de energía útil. En cambio, en el caso de la energía humana y animal la ingesta diaria de alimentos (o pienso) no debería incluirse como aporte de energía para el trabajo humano o animal, porque la mayor parte de esa energía es necesaria para el metabolismo basal —es decir, para mantener activos los órganos vitales, hacer circular la sangre y mantener una temperatura corporal estable—, que funciona independientemente de si las

personas o los animales descansan o trabajan. Lo mejor es calcular el coste energético neto (recuadro 1.10).

RECUADRO 1.10

Calcular el coste energético neto del trabajo humano

No existe una forma unívoca de expresar el coste energético del trabajo humano. Quizá la mejor opción sea calcular el coste energético neto: el consumo de energía total de una persona menos el consumo necesario para su supervivencia en reposo. Así, este método vincula el trabajo humano con su coste energético marginal. El gasto energético total (GET) es el producto de la tasa metabólica basal (TMB) y el nivel de actividad física (NAF) (GET = TMB × NAF), mientras que el coste energético marginal es la diferencia entre el GET y la TMB. La TMB de un hombre adulto de 70 kg sería de 7,5 MJ/día, mientras que el de una mujer de 60 kg sería de 5,5 MJ/día. Asumiendo que el trabajo físico aumenta el requerimiento energético diario en un 30%, entonces el coste energético neto sería de 2,2 MJ/día para los hombres y 1,7 MJ/día para las mujeres. Por tanto, a modo de aproximación utilizaré 2 MJ/día para calcular el coste energético neto diario de la caza y recolección, la agricultura tradicional y el trabajo industrial.

El consumo diario de alimentos no debería considerarse como un aporte energético del trabajo humano porque el metabolismo basal funciona independientemente de si la persona trabaja o descansa. La fisiología muscular, y muy especialmente el trabajo de Archibald V. Hill (1886-1977, ganador del Premio Nobel de Fisiología o Medicina en 1922), permitió cuantificar la eficiencia del trabajo muscular (Hill, 1922; Whipp y Wasserman, 1969). La eficiencia neta del rendimiento aeróbico constante es del 20 %, lo que significa que 2 MJ/día de energía metabólica atribuible a una tarea física produce un trabajo útil de 400 kJ/día. Todos los cálculos relevantes de este libro parten de este supuesto aproximativo. En su comparación histórica de fuentes de energía, Kander, Malanima y Warde (2013) utilizaron la ingesta total de alimentos en lugar del gasto real de energía útil. Asumieron un consumo medio de alimentos de 3,9 GJ/cápita constante entre 1800 y 2008.

No obstante, incluso en sociedades mucho más sencillas que la nuestra, buena parte del trabajo no era físico, sino intelectual (decidir

cómo abordar una tarea, cómo ejecutarla con los medios disponibles, cómo reducir su coste energético, etc.), y el coste metabólico del trabajo intelectual, incluso cuando estamos muy concentrados, es muy pequeño comparado con el esfuerzo muscular. Por otro lado, el desarrollo intelectual requiere años de trabajo de adquisición de idiomas, socialización, aprendizaje y acumulación de experiencia, y, a medida que las sociedades progresaron, este proceso de aprendizaje se hizo más largo y exigente y dio lugar al desarrollo de sistemas formales de educación y formación, que hoy en día constituyen un considerable aporte de energía indirecto de cualquier infraestructura física o actividad humana.

Cerramos un círculo. He subrayado la necesidad del análisis cuantitativo, pero para comprender el verdadero papel de la energía en la historia no basta con reducirla a julios y vatios. En este libro abordaré el desafío de ambos modos: hablaré de requisitos y densidades de energía y potencia y subrayaré las mejoras de eficiencia, sin ignorar los numerosos atributos cualitativos que favorecen o desincentivan cada uso energético específico. Porque los requisitos y usos energéticos han dejado una poderosa huella en la historia, pero muchos detalles, secuencias y consecuencias de estos factores evolutivos determinantes solo pueden explicarse refiriéndonos a las motivaciones y preferencias humanas y reconociendo las sorprendentes —y en ocasiones aparentemente inexplicables— elecciones que conforman la historia de nuestra civilización.

2

LA ENERGÍA EN LA PREHISTORIA

Comprender los orígenes del género *Homo* y los detalles de su evolución posterior es una aventura interminable. Sobre todo cuando muchos hallazgos recientes contradicen antiguos marcadores y complican nuestra visión de conjunto con el descubrimiento de especies que no encajan fácilmente en el árbol evolutivo existente (Trinkaus, 2005; Reynolds y Gallagher, 2012). En 2015, los restos fósiles más antiguos de homínidos fechados con fiabilidad eran los de *Ardipithecus ramidus* (4,4 millones de años, encontrados en 1994) y *Australopithecus anamensis* (4,1-5,2 millones de años, encontrados en 1967). Ese año se añadieron los restos de *Australopithecus deyiremeda* (3,3-3,5 millones de años), en Etiopía (Haile-Selassie *et al*., 2015). La secuencia de homínidos más recientes incluye *Australopithecus afarensis* (desenterrado en 1974 en Tanzania y Etiopía), *Homo habilis* (descubierto en 1960 en Tanzania) y *Homo erectus* (originado hace 1,8 millones de años, que se extendió hasta hace 250.000 años, con muchos hallazgos en África, Asia y Europa).

Nuevos análisis de los primeros huesos de *Homo sapiens* —el famoso descubrimiento de Richard Leakey en Etiopía en 1967— sitúan su antigüedad en torno a 190.000 años (McDougall, Brown y Fleagle, 2005). Nuestros antepasados directos vivieron como simples

cazadores-recolectores. Hace solo 10.000 años que pequeñas poblaciones de *Homo sapiens* iniciaron una existencia sedentaria basada en la domesticación de plantas y animales. Esto significa que durante millones de años las estrategias de búsqueda de alimentos de los homínidos se parecieron mucho a las de sus ancestros primates, aunque ahora tenemos pruebas isotópicas provenientes de África Oriental de que hace 3,5 millones de años la dieta de los homínidos comenzó a diferir de la de otros simios. Sponheimer *et al.* (2013) señalaron que a partir de ese momento varios taxones de homínidos incorporaron alimentos enriquecidos con ^{13}C (producidos por el metabolismo del ácido C4 o crasuláceo) en su dieta, mostrando una composición de isótopos de carbono altamente variable y diferente de la de otros mamíferos africanos. Por consiguiente, la dependencia hacia plantas con C4 es de origen antiguo y en la agricultura moderna dos cultivos con C4, el maíz y la caña de azúcar, tienen un rendimiento medio más elevado que cualquier otra especie cultivada por su contenido en grano o azúcar.

El primer desvío evolutivo que con el tiempo condujo a nuestra especie no fue un cerebro mayor o la fabricación de herramientas, sino el bipedismo, una adaptación estructuralmente improbable pero con inmensas consecuencias cuyos inicios se remontan a hace siete millones de años (Johanson, 2006). Los humanos son los únicos mamíferos cuya forma habitual de locomoción es caminar de pie (otros primates lo hacen solo de vez en cuando), y, por consiguiente, puede decirse que el bipedismo fue la adaptación clave para que surgiera nuestra especie. Sin embargo, el bipedismo —que esencialmente es una secuencia de caídas detenidas— es inherentemente inestable y torpe: «Los humanos caminamos de forma arriesgada. Sin una sincronización perfecta, caeríamos de bruces constantemente. De hecho, rozamos la catástrofe con cada paso que damos» (Napier, 1970: 165). Además de hacernos propensos a las lesiones musculoesqueléticas, el bipedismo también conduce a la

osteopenia (densidad ósea inferior a la normal) y la osteoporosis (Latimer, 2005).

Existen muchas teorías para intentar entender por qué, entonces, desarrollamos el bipedismo, pero, como explica Johanson (2006), muchas son poco convincentes. Parecer más alto para intimidar a los depredadores no habría suscitado ningún efecto en perros salvajes, guepardos o hienas, que atacan a especies de mamíferos mucho mayores que ellas; ponerse de pie para ver por encima de la hierba alta habría atraído a los depredadores; podría haberse alcanzado la fruta de las ramas más bajas de los árboles sin renunciar a la carrera rápida de los cuadrúpedos; y el enfriamiento del cuerpo podría haberse conseguido descansando a la sombra y alimentándose solo durante las mañanas o noches más frías. La mejora del consumo energético total parece una explicación más convincente (Lovejoy, 1988): los homínidos, igual que otros mamíferos, destinan buena parte de su energía a reproducirse, alimentarse y cobijarse; si el bipedismo hubiera supuesto una ventaja en todos estos ámbitos, entonces su adopción habría sido una buena estrategia.

Como dice Johanson (2006: 2), «la selección natural no puede "crear" un comportamiento como el bipedismo, pero puede seleccionarlo una vez que ha surgido». En sentido estricto, no está claro que el coste energético de caminar ofrezca una ventaja biomecánica suficiente para promover la selección del bipedismo (Richmond *et al*., 2001), aunque, después de medir el gasto energético en chimpancés y en humanos adultos, Sockol, Raichlen y Pontzer (2007) descubrieron que nuestro paso requiere un 75% menos de energía que el paso bípedo o cuadrúpedo de un chimpancé. La disimilitud tiene que ver con diferencias biomecánicas de anatomía y marcha y sobre todo con la presencia de una cadera más amplia y una extremidad posterior más larga en humanos.

El bipedismo activó una cascada de enormes ajustes evolutivos (Kingdon, 2003; Meldrum y Hilton, 2004). Caminar de pie liberó los brazos de los homínidos y les permitió utilizar armas y transportar

alimentos hasta sus asentamientos en lugar de consumirlos en el momento. También desencadenó el desarrollo de la destreza manual y el uso de herramientas. Hashimoto *et al*. (2013) concluyeron que las adaptaciones subyacentes al uso de herramientas evolucionaron independientemente de las requeridas para el bipedismo humano, pues tanto en monos como humanos cada dedo está representado de manera independiente en la corteza sensoriomotora primaria y se encuentra físicamente separado en la mano. Esto permite usar cada dedo por separado y llevar a cabo manipulaciones complejas necesarias para el uso de herramientas. Pero sin bipedismo sería imposible utilizar el tronco como palanca para acelerar la mano durante la fabricación y el uso de herramientas. El bipedismo también modificó la boca y los dientes, de tal manera que se desarrolló un sistema de llamadas más complejo, predecesor del lenguaje (Aiello, 1996). Todo esto requirió un cerebro más grande y con un coste energético que con el tiempo triplicó el de los chimpancés, lo que representa una sexta parte de la tasa metabólica basal total (Foley y Lee, 1991; Lewin, 2004). El cociente de encefalización medio (masa cerebral real/teórica en función del peso corporal) es de 2-3,5 en primates y homínidos antiguos y superior a 6 en humanos. Hace tres millones de años, el *Australopithecus afarensis* tenía un volumen cerebral de menos de 500 cm^3. Hace 1,5 millones de años, el *Homo erectus* lo había duplicado. Con el *Homo sapiens* aumentó en un 50% (Leonard, Snodgrass y Robertson, 2007).

El crecimiento del cociente de encefalización fue crítico para el aumento de la complejidad social (que mejoró la probabilidad de supervivencia y separó a los homínidos de otros mamíferos) y estuvo estrechamente relacionado con cambios en la calidad de la dieta. El cerebro necesita 16 veces más energía que los músculos esqueléticos. Nuestro cerebro reclama un 20-25% de la energía metabólica basal, el de los primates un 8-10% y el de otros mamíferos un 3-5% (Holliday, 1986; Leonard *et al*., 2003). La única forma de gestionar un cerebro tan grande y mantener la misma tasa metabólica total (porque el

metabolismo humano basal no es más alto que el de otros mamíferos de peso similar) era reducir la masa de otros tejidos metabólicamente «caros». Aiello y Wheeler (1995) argumentaron que la mejor opción era reducir el tamaño del tracto gastrointestinal, porque la masa intestinal (a diferencia de la del corazón o los riñones) varía sustancialmente en función de la dieta.

Fish y Lockwood (2003), Leonard, Snodgrass y Robertson (2007) y Hublin y Richards (2009) confirmaron que la calidad de la dieta y la masa cerebral tienen una correlación positiva significativa en primates y que la mejora de la dieta de los homínidos (incluida la carne) hizo posible el crecimiento del cerebro, cuyo alto coste energético fue parcialmente compensado por la reducción del tracto gastrointestinal (Braun *et al*., 2010). Mientras que el colon representa más del 45% de la masa intestinal de los primates no humanos y el intestino delgado el 14-29% de la misma, en los humanos las proporciones se invierten: el intestino delgado representa más del 56% y el colon el 17-25%. Se trata de una clara señal de adaptación a alimentos de alta calidad y densos en energía (carne y nueces) y que se digieren en el intestino delgado. El aumento del consumo de carne también contribuye a explicar el aumento de la altura y la masa corporal de los humanos, así como la presencia de mandíbulas y dientes más pequeños (McHenry y Coffing, 2000; Aiello y Wells, 2002). Con todo, el consumo de carne no modificó la base energética de los homínidos, que siempre dependieron de sus propios músculos y estrategias rudimentarias cuando recolectaban, buscaban cadáveres comestibles, pescaban y cazaban para conseguir alimentos.

Es imposible rastrear la génesis de las primeras herramientas de madera (bastones y garrotes), porque los únicos artefactos que se han conservado durante periodos prolongados han sido los que se encontraban en ambientes anóxicos (comúnmente pantanos). Este problema no se da con piedras utilizadas para crear herramientas simples, y, de hecho, hallazgos recientes han retrasado progresivamente la fecha de aparición de las mismas. Durante varias

décadas se fechó su aparición hace unos 2,5 millones de años. Las herramientas de Oldowan —percutores sencillos, cantos tallados y lascas— hicieron mucho más fácil matar animales y romper sus huesos (De la Torre, 2011). Pero nuevos hallazgos en Lomekwi, en el oeste de Turkana, en Kenia, retrasan la fecha de fabricación de las primeras herramientas de piedra hasta hace 3,3 millones de años (Harmand *et al*., 2015).

Hace 1,5 millones de años los homínidos comenzaron a extraer lascas más grandes para fabricar picos, hachas de mano bifaciales y cuchillas de estilo achelense (1,2-0,1 millones de años). Aunque la talla de un núcleo solo producía cantos tallados afilados de menos de 20 cm, estas prácticas dieron lugar a numerosas herramientas especiales de piedra (figura 2.1). Las lanzas de madera, por ejemplo, fueron esenciales para cazar animales más grandes. En Alemania se han encontrado una lanza casi completa dentro de un esqueleto de elefante del último periodo interglacial (hace 125.000-115.000 años) y lanzas arrojadizas en una mina de lignito a cielo abierto de hace 400.000-380.000 años (Thieme, 1997). Y sabemos que empezaron a añadirse puntas de piedra a las lanzas arrojadizas de madera hace unos 300.000 años.

Figura 2.1 Las herramientas de piedra achelenses, fabricadas por primera vez por el *Homo ergaster*, consistían en cuchillas de corte especializadas fabricadas a partir de la talla de lascas de piedra (Corbis).

Pero nuevos descubrimientos en Sudáfrica sitúan la aparición de las primeras herramientas artesanales multicomponentes 200.000 años antes de lo que pensábamos: Wilkins *et al.* (2012) concluyeron que las puntas de piedra de Kathu Pan, fabricadas hace 500.000 años, funcionaban como puntas de lanza. El armamento de proyectiles de largo alcance evolucionó en África entre 90.000 y 70.000 años atrás (Rhodes y Churchill, 2009). Otro descubrimiento reciente en Sudáfrica mostró que un avance técnico significativo —la producción de pequeñas cuchillas (microlitos) de piedra tratada con calor utilizadas en la fabricación de herramientas compuestas— tuvo lugar

hace 71.000 años (Brown *et al*., 2012). Las herramientas compuestas más grandes se generalizaron hace solo 25.000 años (durante el periodo Gravetiense, en Europa) con la producción de azadones y azuelas y hachas forjadas y una descamación más eficiente del sílex, que permitió producir muchas herramientas afiladas. Durante esa época también se inventaron y adoptaron arpones, agujas, sierras, cerámicas y artículos de fibra tejida (ropa, redes, cestas).

Las técnicas magdalenienses (hace 17.000-12.000 años; el periodo lleva el nombre de un abrigo en La Madeleine, en el sur de Francia, en el que se descubrieron herramientas) permitieron producir hasta 12 m de bordes de microcuchilla a partir de una sola piedra. Experimentos con réplicas modernas (montados en lanzas) muestran su gran eficacia en la caza (Pétillon *et al*., 2011). Las lanzas con punta de piedra se convirtieron en un arma aún más potente después de la aparición de lanzadores de jabalinas durante el Paleolítico tardío. El tiro con propulsor duplicó la velocidad del proyectil y redujo la necesidad de acercarse a la presa. Las flechas con punta de piedra supusieron una mejora en este sentido y generaron mayor precisión.

Nunca sabremos con exactitud cuándo surgió el uso controlado del fuego para calentar y cocinar. El paso del tiempo y las generaciones posteriores destruyeron todas las pruebas relevantes posibles, tanto en cuevas como al aire libre. Con todo, el primer uso atestiguado del fuego controlado ha ido retrocediendo en el tiempo: Goudsblom (1992) lo situó hace 250.000 años; una década después, Goren-Inbar *et al*. (2004) lo ubicaron hace 790.000 años; y el registro fósil sugiere que se consumieron alimentos cocinados hace 1,9 millones de años. Lo que sí sabemos es que durante el Paleolítico superior —hace 30.000-20.000 años, cuando el *Homo sapiens sapiens* desplazó a los neandertales de Europa— el uso del fuego ya se había generalizado (Bar-Yosef, 2002; Karkanas *et al*., 2007).

Cocinar siempre ha sido considerado un componente importante de la evolución humana. Wrangham (2009) piensa que tuvo un efecto gigantesco en nuestros antepasados porque su adopción aumentó

enormemente la cantidad y la calidad de alimentos disponibles y trajo consigo muchos cambios físicos (incluidos dientes más pequeños y un tracto digestivo menos voluminoso) y comportamentales (como la necesidad de defender las reservas de alimentos acumulados, que promovieron lazos protectores entre hombres y mujeres) que con el tiempo condujeron a una socialización compleja, la vida sedentaria y la «autodomesticación». La cocina prehistórica se hacía siempre con un fuego al aire libre, con carne suspendida sobre las llamas, enterrada en brasas calientes, colocada sobre rocas calientes, encerrada en piel dura, cubierta de arcilla o colocada con piedras calientes en bolsas de cuero llenas de agua. Es imposible calcular la eficiencia típica de conversión de combustible debido a la variedad de configuraciones y métodos de cocción. Se han llevado a cabo experimentos que han mostrado que un 2-10% de la energía de la madera se transforma en calor útil para cocinar y la hipótesis más plausible contempla un consumo anual máximo de madera de 100-150 kg/persona/año (recuadro 2.1).

RECUADRO 2.1

Consumo de leña para la cocción de carne al aire libre

Los supuestos realistas para establecer los máximos plausibles de consumo de madera para la cocción de carne al aire libre durante el Paleolítico tardío son los siguientes (Smil, 2013a): ingesta diaria media de energía alimentaria de 10 MJ/persona (adecuada para adultos, superior a la media para poblaciones enteras), con un 80 % (8 MJ) del total compuesto de carne; una densidad de energía alimentaria de los cadáveres de animales de 8-10 MJ/kg para los mamuts y 5-6 MJ/kg para los ungulados grandes; una temperatura ambiente media de 20 °C en climas cálidos y 10 °C en climas más fríos; carne cocida a 80 °C (bastan 77 °C para cocer carne adecuadamente); una capacidad calorífica de la carne de unos 3 kJ/kg °C; una eficiencia de cocción del fuego al aire libre del 5 %; y una densidad de energía media de la madera secada al aire libre de 15 MJ/kg. Estos supuestos implican una ingesta diaria media per cápita de 1 kg de carne de mamut (o 1,5 kg de carne de ungulado grande) y un

consumo diario de madera de 4-6 MJ. El total anual sería de 1,5-2,2 GJ y 100-150 kg de madera (en parte secada y en parte sin secar). Para las 200.000 personas que vivían en el mundo hace 20.000 años, el consumo global habría sido de 20.000-30.000 t, una proporción insignificante (del orden de 10^{-8}) de la fitomasa leñosa preagrícola.

Además de para calentar y cocinar, el fuego también se usó como herramienta de ingeniería: hace al menos 164.000 años que los humanos modernos utilizan calor para mejorar las propiedades de descamación de las piedras (Brown *et al.*, 2009). Y Mellars (2006) sugirió que existen pruebas de quema controlada de vegetación en Sudáfrica de hace 55.000 años. La quema de bosques como herramienta de gestión ambiental durante el Holoceno temprano habría facilitado la caza (al promover la regeneración del forraje para atraer animales y mejorar la visibilidad), la movilidad humana y la recolección sincronizada de plantas (Mason, 2000).

La gran variabilidad espacial y temporal del registro arqueológico nos impide conocer el balance energético preciso de las sociedades prehistóricas. El estudio antropológico de cazadores-recolectores modernos en ambientes extremos no nos dice gran cosa sobre el modo de vida de cazadores-recolectores prehistóricos en climas más suaves y regiones más fértiles. Además, muchas sociedades estudiadas se han visto afectadas por el contacto prolongado con pastores, agricultores o migrantes extranjeros (Headland y Reid, 1989; Fitzhugh y Habu, 2002). Con todo, la ausencia de un patrón característico no impide reconocer que existen una serie de imperativos biofísicos que rigen los flujos de energía y determinan el comportamiento de los grupos de cazadores-recolectores.

SOCIEDADES DE CAZADORES-RECOLECTORES

Disponemos de pruebas fiables que muestran que la densidad de población media de las poblaciones modernas de cazadores-

recolectores —que reflejan una variedad de hábitats naturales y habilidades y técnicas de adquisición de alimentos— oscilan en tres órdenes de magnitud (Murdock, 1967; Kelly, 1983; Lee y Daily, 1999; Marlowe, 2005), entre menos de una persona y varios centenares por cada 100 km^2, con una media global de 25 personas en 340 sociedades estudiadas. Se trata de una densidad demasiado baja para posibilitar el surgimiento de sociedades más complejas en las que exista una creciente especialización funcional y estratificación social. De hecho, es una densidad inferior a la de mamíferos herbívoros de masa parecida capaces de digerir abundante fitomasa celulósica.

Aunque las ecuaciones alométricas predicen unos cinco mamíferos de 50 kg/km^2, en realidad la densidad de población en chimpancés varía entre 1,3 y 2,4 animales/km^2, mientras que en cazadores-recolectores modernos es muy inferior a una persona/km^2 en climas cálidos: 0,24 en África y Eurasia y 0,4 en América (Marlowe, 2005; Smil, 2013a). La densidad de población de los grupos que combinaron la recolección de plantas abundantes y la caza (existen ejemplos bien estudiados en la Europa posglacial y más tarde en la cuenca de México) fue muy superior, igual que la de sociedades costeras dependientes de especies acuáticas (existen yacimientos arqueológicos en el Báltico y estudios antropológicos modernos en el noroeste del Pacífico).

La recogida de moluscos, la pesca y la caza de costa de mamíferos marinos sostuvieron poblaciones más densas y condujeron a asentamientos semipermanentes o incluso permanentes. Es conocido el sedentarismo de las aldeas costeras del Pacífico noroeste, con sus grandes casas y la caza comunitaria organizada de mamíferos marinos. Estas grandes variaciones de densidad no eran una función simple de los flujos de energía biosféricos. Es decir, no disminuían uniformemente hacia el polo y aumentaban hacia el ecuador (en proporción a una mayor productividad fotosintética) ni correspondían a la masa total de animales disponibles para la caza, sino que dependían de variables ecosistémicas, de alimentos de origen animal y

vegetal y del uso de sistemas de almacenamiento estacional. Todos los cazadores-recolectores eran omnívoros (igual que los primates no humanos), pero matar animales grandes constituía un desafío energético importante, al tratarse de un depósito de alimento mucho más pequeño en conjunto que la recolección de plantas, una consecuencia natural de la transferencia decreciente de energía entre niveles tróficos.

Los herbívoros consumen solo un 1-2% de la producción primaria neta en bosques templados caducifolios y hasta un 50-60% en algunas praderas tropicales, mientras que el pastoreo terrestre suele representar un 5-10% (Smil, 2013a). Generalmente, menos del 30% de la fitomasa ingerida es digerida; la mayor parte es respirada y en mamíferos y aves solo el 1-2% se convierte en zoomasa. Por tanto, los herbívoros cazados habitualmente representaban menos del 1% de la energía inicialmente almacenada en la fitomasa de los ecosistemas que habitaban. Esto explica por qué los cazadores preferían matar animales que combinaban una masa corporal y una productividad y densidad territoriales elevadas: los objetivos más habituales eran cerdos salvajes (90 kg) y ciervos y antílopes (25-500 kg).

Allí donde este tipo de animales era relativamente común, por ejemplo, en pastizales templados y tropicales o bosques claros tropicales, la caza resultaba más fácil. En cambio, las selvas tropicales no eran buenos ecosistemas para la caza. Muchos animales selváticos pertenecen a pequeñas especies arbóreas folívoras y frugívoras (monos, pájaros), activas e inaccesibles y a menudo nocturnas, y cazarlas tiene un retorno de energía bajo. Sillitoe (2002) descubrió que en la selva tropical lluviosa de las tierras altas de Papúa Nueva Guinea tanto la caza como la recolección son costosas, ya que los recolectores gastan hasta cuatro veces más energía en la caza que la que obtienen de ella en forma de alimentos. Obviamente, con un retorno de energía tan bajo la caza no puede ser un medio importante de suministro de alimentos (un retorno de energía negativo solo se explica por el interés

en la captura de proteína animal), y, de hecho, Sillitoe observa formas de agricultura itinerante para proporcionar comida suficiente.

Bailey *et al.* (1989) concluyeron que no existen estudios etnográficos fiables de cazadores-recolectores que vivieran en selvas tropicales sin una cierta dependencia respecto a plantas y animales domesticados. Más adelante, Bailey y Headland (1991) cuestionaron esta afirmación al hallar evidencias arqueológicas de que la abundancia de sagú y cerdos en Malasia habría permitido excepciones. Sorprendentemente, la recolección también fue poco productiva en los trópicos —abundantes en especies vegetales— y en bosques templados. Estos ecosistemas almacenan buena parte de la fitomasa del planeta, pero se trata principalmente de tejidos muertos de troncos de grandes árboles cuya celulosa y lignina no podemos digerir (Smil, 2013a). Las frutas y semillas ricas en energía son una parte muy pequeña de la masa total de la planta y, al hallarse en copas elevadas, a menudo son inaccesibles; las semillas suelen estar protegidas por capas duras y exigen un procesamiento intensivo en energía para su consumo. En las selvas tropicales la recolección también requería una búsqueda más intensiva: la existencia de una gran variedad de especies significa que puede existir una distancia considerable entre los árboles o las enredaderas cuyas partes pueden ser recolectadas (figura 2.2). La cosecha de nueces de Brasil constituye un ejemplo perfecto de todas estas limitaciones (recuadro 2.2).

En contraste con la dificultad de la caza en selvas tropicales y boreales, los pastizales y matorrales templados ofrecían excelentes oportunidades para la recolección y la caza. Aunque almacenan mucha menos energía por unidad de área que una selva densa, una mayor parte de esta se presenta en forma de semillas y frutas fácilmente recolectables y altamente nutritivas o como concentraciones de grandes raíces y tubérculos con almidón. La alta densidad energética de los frutos secos (hasta 25 MJ/kg) los hacía especialmente apetecibles, y algunos de ellos, como las bellotas y las castañas, también eran fáciles de recolectar. Y, a diferencia de lo que ocurre en

la selva, muchos animales que pastan en praderas pueden alcanzar tamaños muy grandes, se mueven en rebaños masivos y ofrecen un excelente retorno de energía cuando se los caza.

Además, los homínidos podían conseguir carne en pastizales y matorrales incluso sin utilizar armas, como carroñeros, corredores e ingeniosos planificadores. Dada la poco impresionante dotación física de los primeros seres humanos y la ausencia de armas eficaces, es muy probable que nuestros antepasados fueran mucho mejores como carroñeros que como cazadores (Blumenschine y Cavallo, 1992; Pobiner, 2015). Los grandes depredadores —leones, leopardos y gatos con dientes de sable— solían dejar cadáveres de herbívoros a medio comer. Esta carne —o al menos la médula ósea nutritiva— pudo ser recuperada por humanos avispados antes de ser devorada por buitres, hienas y otros carroñeros. Con todo, Domínguez-Rodrigo (2002) argumenta que por sí solo el carroñeo no pudo ser suficiente y que solo la caza pudo generar suficiente proteína animal en los pastizales. En cualquier caso, el bipedismo humano y una capacidad de sudación superior a la de cualquier otro mamífero también permitieron perseguir hasta el agotamiento incluso a los herbívoros más rápidos (recuadro 2.3).

Figura 2.2 Las selvas tropicales poseen muchas especies, pero son relativamente pobres en plantas capaces de dar alimento a grandes poblaciones de recolectores. Esta imagen muestra una cubierta vegetal en La Fortuna, Costa Rica (Corbis).

RECUADRO 2.2

Cosechar nueces de Brasil

Debido a su alto contenido en lípidos (un 66%), las nueces de Brasil tienen un contenido energético de unos 27 MJ/kg (comparado con los 15 MJ/kg del grano de cereales), poseen un 14% de proteínas y también son una fuente importante de potasio, magnesio, calcio, fósforo y selenio (Nutrition Value, 2015). Sin embargo, cosecharlas es exigente y peligroso. La *Bertholletia excelsa* puede medir hasta 50 metros de altura en forma de árboles individuales muy dispersos. Cada cápsula pesada (hasta 2 kg) está cubierta de un endocarpio duro similar al coco y contiene entre 8 y 24 nueces. Los recolectores deben llevar a cabo la cosecha en el momento exacto: si lo hacen demasiado pronto, las vainas aún son inaccesibles y los recolectores deben desperdiciar energía en realizar otro viaje; si lo hacen demasiado tarde, los agutíes (*Dasyprocta punctata*), grandes roedores capaces de abrir las vainas

caídas, se comen las semillas de inmediato o las entierran en escondites (Haugaasen et *al*., 2010).

Carrier (1984) cree que las sobresalientes tasas de disipación de calor humano proporcionaron una notable ventaja evolutiva que permitió que nuestros antepasados se apropiaran de un nuevo nicho ecológico, el de los depredadores diurnos de alta temperatura. Sabemos que las poblaciones que emigraron a climas más fríos conservaron la capacidad de sudar profusamente —y, por tanto, trabajar duro en ambientes cálidos— porque no hay una diferencia notable en la densidad de las glándulas ecrinas entre poblaciones de diferentes zonas climáticas (Taylor, 2006). De hecho, las personas de latitudes medias y altas igualan las tasas de sudoración de los nativos de climas cálidos después de un corto periodo de aclimatación.

No obstante, una vez inventadas las herramientas adecuadas, fue preferible cazar con ellas que perseguir a las presas. Después de examinar 51 ensamblajes del Paleolítico medio y 98 del Paleolítico superior, Faith (2007) confirmó que los primeros cazadores africanos ya eran perfectamente capaces de matar grandes animales ungulados, incluido el búfalo. Los imperativos energéticos de la caza mayor también supusieron una contribución incalculable a la socialización humana. Trinkaus (1987: 131-132) concluyó que «puede considerarse que muchas características humanas distintivas —como el bipedismo, la destreza manual, la elaboración de nuevas tecnologías o la encefalización— fueron promovidas por las exigencias de un sistema de caza y recolección oportunista».

RECUADRO 2.3

La capacidad de correr y la disipación de calor en humanos

Los cuadrúpedos tienen velocidades óptimas para diferentes pasos o patrones de movimiento (como el paso, el trote y el galope de los caballos). El coste de

energía de la carrera humana es relativamente alto comparado con el de mamíferos de peso parecido, pero, a diferencia de ellos, los humanos podemos desacoplar ese coste para cualquier velocidad común de 2-6 m/s (Carrier, 1984; Bramble y Lieberman, 2004). El bipedismo y la eficiencia en la disipación de calor explican esta ventaja. La ventilación cuadrúpeda se limita a una respiración por ciclo locomotor. Los huesos y los músculos torácicos de los cuadrúpedos deben absorber el impacto en las extremidades delanteras porque la unión dorsoventral comprime y expande rítmicamente el tórax. En cambio, la frecuencia de la respiración humana puede variar en función de la frecuencia de zancada: es decir, los humanos podemos correr a la velocidad que queramos (dentro de un rango), mientras que la velocidad óptima en cuadrúpedos está estructuralmente determinada.

La extraordinaria capacidad de termorregulación de los humanos se basa en una capacidad de sudoración muy elevada. Los caballos pierden agua a través de la piel a un ritmo horario de 100 g/m^2. Los camellos pueden perder hasta 250 g/m^2 de agua por hora. Los humanos, en cambio, perdemos más de 500 g/m^2/hora y podemos alcanzar máximos de hasta 2 kg/m^2/hora (Torii, 1995; Taylor y Machado-Moreira, 2013). La tasa de sudoración se traduce en una pérdida de calor de 550-625 W, suficiente para regular la temperatura incluso durante un trabajo extremadamente arduo. Las personas también podemos beber menos de lo que sudamos y compensar cualquier deshidratación parcial temporal horas después. Correr nos convirtió en depredadores diurnos de alta temperatura capaces de perseguir animales hasta el agotamiento (Heinrich, 2001; Liebenberg, 2006). Las persecuciones mejor documentadas son las de los tarahumaras del norte de México persiguiendo ciervos, y las de los paiutes y navajos acosando antílopes americanos. Los bosquimanos del desierto del Kalahari podían perseguir duikers, órices del Cabo e incluso cebras hasta el agotamiento, igual que algunos aborígenes australianos, canguros. Los cazadores de antaño corrían descalzos y aún y así gastaban un 4% menos de energía y tenían menos lesiones agudas de tobillo y crónicas de pantorrilla que los corredores modernos utilizando calzado deportivo (Warburton, 2001).

La importancia de la caza en la evolución de las sociedades humanas es evidente. El éxito de la caza de grandes animales en solitario o con armas primitivas era bajísimo, de tal modo que se formaron grupos para rastrear animales heridos, matarlos, transportar

su carne y compartirla. La caza comunal generaba, con mucho, las mayores recompensas mediante la persecución de animales en espacios confinados —usando rampas, cercas de madera o carriles de conducción hechos con maleza o piedra— y su captura en corrales y trampas naturales e incluso —y quizá esta fuera la solución más simple e ingeniosa— haciendo que cayeran por acantilados (Frison, 1987). Muchos herbívoros grandes (mamuts, bisontes, ciervos, antílopes y muflones) eran cazados utilizando estos métodos y proporcionaban reservas de carne congelada, ahumada o en forma de pemmican.

El precipicio de los bisontes de Head-Smashed-In, situado cerca de Fort Macleod, en Alberta, y Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO, es uno de los lugares más espectaculares en los que se utilizó esta ingeniosa estrategia de caza durante 5.700 años. «Para iniciar la caza [...] los hombres jóvenes [...] imitaban el balido de un ternero perdido para que el rebaño los siguiera. A medida que los bisontes se acercaban a los carriles de conducción —previamente se habían colocado largas hileras de mojones de piedra para ayudar a los cazadores a dirigir a los bisontes hacia el acantilado—, los cazadores se situaban detrás de la manada y contra el viento y asustaban a los animales gritando y agitando pieles», y finalmente estos caían por el precipicio (UNESCO, 2015a). El retorno energético neto en proteína animal y grasa era muy alto. Los cazadores del Pleistoceno tardío pudieron haber sido tan hábiles que, aunque las conclusiones siguen siendo inciertas (recuadro 2.4), expertos del Cuaternario piensan que la caza pudo ser la principal responsable —o incluso la única— de la desaparición relativamente rápida de la megafauna paleolítica tardía, es decir, de los animales con un peso de más de 50 kg (Martin, 1958, 2005; Fiedel y Haynes, 2004).

RECUADRO 2.4

Extinción de la megafauna durante el Pleistoceno tardío

El sacrificio o la caza persistente de animales de reproducción lenta (aquellos que tienen una sola cría nacida después de un periodo largo de gestación) pudo llevar a su extinción. Si suponemos que los recolectores del Pleistoceno tardío requerían 10 MJ de alimentos por persona al día, que comían principalmente carne y que un 80% de la carne provenía de la megafauna, entonces una población de dos millones de personas hubiera consumido casi 2 Mt (peso fresco) de carne (Smil, 2013a). Si la única especie cazada fuera el mamut, se habrían matado 250.000-400.000 animales al año. La caza de megaherbívoros también apuntó a otros mamíferos grandes (elefantes, ciervos gigantes, bisontes, uros). La obtención de 2 Mt de carne a partir de una mezcla de estas especies habría requerido matar unos dos millones de animales al año. Con todo, es más probable que las extinciones del Pleistoceno tardío se deban a una combinación de factores naturales (cambio climático y vegetativo) y antropogénicos (caza y fuego) (Smil, 2013a).

Todas las sociedades preagrícolas eran omnívoras; no podían permitirse el lujo de ignorar ningún recurso alimenticio disponible. Aunque los cazadores-recolectores comían una gran variedad de plantas y animales, sus dietas solían estar dominadas por unos pocos alimentos. Como no podía ser de otra forma, preferían las semillas: son fáciles de recolectar y almacenar y además poseen un alto contenido energético y proteínico. Las semillas de hierbas salvajes almacenan tanta energía como los granos de cultivo (15 MJ/kg en el caso del trigo), mientras que la densidad energética de los frutos secos es hasta un 80% más elevada (27,4 MJ/kg en el caso de las nueces).

Toda la carne salvaje es una excelente fuente de proteínas, pero la mayoría contiene muy poca grasa y, por tanto, tiene una densidad de energía muy baja (menos de la mitad que la de los granos en el caso de mamíferos pequeños y magros). No es sorprendente que existiera una preferencia generalizada hacia la caza de especies grandes y relativamente grasas. Un solo mamut pequeño proporcionaba tanta energía comestible como 50 renos, y un bisonte equivalía fácilmente a 20 ciervos (recuadro 2.5). Esto explica por qué durante el Neolítico nuestros antepasados estuvieron dispuestos a emboscar a enormes

mamuts con armas rudimentarias con punta de piedra, o por qué los indios de las llanuras de América del Norte invirtieron tanta energía en perseguir bisontes a partir de los cuales preparar pemmican.

Pero la dimensión energética no proporciona por sí sola una explicación completa de la alimentación de nuestros antepasados. La teoría del forrajeo óptimo, según la cual los animales adoptamos la estrategia de búsqueda de alimentos que nos proporciona un mayor beneficio energético al menor coste —y, por tanto, maximiza la energía neta obtenida—, explica la preferencia por cazar mamíferos grandes y grasos o por recolectar partes de plantas poco nutritivas pero que no necesitan procesamiento (en lugar de nueces densas en energía pero difíciles de romper). Sin duda, muchos cazadores-recolectores lograron maximizar su retorno energético neto. Pero el forrajeo óptimo no pudo ser una estrategia universal (Bettinger, 1991), ya que existían imperativos existenciales que funcionaban en contra de dicho comportamiento, como, por ejemplo, la disponibilidad de refugios nocturnos seguros, la obligación de defender territorios contra grupos competidores o la necesidad de encontrar vitaminas, minerales y fuentes de agua fiables. Las preferencias alimentarias y la predisposición hacia el trabajo también fueron importantes (recuadro 2.6).

Nuestra incapacidad para reconstruir los equilibrios energéticos prehistóricos ha provocado generalizaciones inadmisibles. Se sabe que el esfuerzo de forrajeo de algunos grupos era relativamente bajo (unas horas al día). Esto condujo a la teoría de la «sociedad afluente original», según la cual los cazadores-recolectores vivieron en un mundo lleno de bienes materiales, ocio y sueño (Sahlins, 1972). En particular, se creía que la tribu bosquimana !Kung, que vivía de plantas silvestres y carne en el desierto del Kalahari, en Botsuana, proporcionaba un ejemplo perfecto de la vida plácida, saludable y vigorosa de los pueblos prehistóricos (Lee y DeVore, 1968). Sin embargo, esta conclusión es poco fiable y ha sido ampliamente cuestionada (Bird-David, 1992; Kaplan, 2000; Bogin, 2011).

RECUADRO 2.5

Masas corporales, densidades de energía y contenido de energía alimentaria de animales cazados

Animales	Masa corporal (kg)	Densidad de energía (MJ/kg)	Energía alimentaria por animal (MJ)
Ballenas	5.000-40.000	25-30	80.000-800.000
Grandes proboscídeos (elefantes, mamuts)	500-4.000	10-12	2.500-24.000
Grandes bóvidos (uros, bisontes)	200-400	10-12	1.000-2.400
Grandes cérvidos (alces, renos)	100-200	5-6	250-600
Focas	50-150	15-18	500-1.800
Pequeños bóvidos (ciervos, gacelas)	10-60	5-6	25-180
Grandes monos	3-10	5-6	5-30
Lagomorfos (liebres, conejos)	1-5	5-7	3-17

Nota: supongo que la porción comestible es de dos tercios de la masa corporal en ballenas y focas y de la mitad de la masa corporal en otros animales. He calculado la densidad de energía media de las ballenas asumiendo que el 25% de su masa corporal es grasa.

Fuentes: Sanders, Parsons y Santley (1979), Sheehan (1985) y Medeiros *et al.* (2001).

Las teorías sobre la riqueza de los cazadores-recolectores ignoran tanto la cantidad de trabajo duro y a menudo peligroso que exigía la búsqueda de alimentos como la frecuencia con la cual el estrés ambiental y las enfermedades infecciosas asolaban la mayoría de sociedades de la época. La escasez estacional de alimentos, por ejemplo, obligaba a comer tejidos vegetales muy desagradables y conducía a la pérdida de peso y hambrunas devastadoras. También provocaban una alta mortalidad infantil (incluido el infanticidio) y niveles bajos de fertilidad. Como era de esperar, un nuevo análisis del gasto energético y de datos demográficos recopilados en la década de 1960 concluyó que el estado nutricional y la salud de los bosquimanos «eran, en el mejor de los casos, precarios, y, en el peor, propios de una sociedad en peligro de extinción» (Bogin, 2011: 349). Como dijo Froment (2001: 259): «Los cazadores-recolectores tuvieron que lidiar con numerosas enfermedades y otros peligros. No vivieron —nunca vivieron— en el jardín del Edén. No eran ricos, sino pobres con necesidades y satisfacciones muy limitadas».

RECUADRO 2.6

Preferencias alimentarias y predisposición hacia el trabajo

Las preferencias alimentarias pueden ilustrarse comparando dos grupos de alimentación muy similares entre sí. La tribu bosquimana !Kung es conocida en la literatura antropológica por su dependencia respecto a las nueces de mongongo, que son muy abundantes y nutritivas y otorgan el mejor retorno de energía jamás documentado en la recolección de alimentos. En cambio, la tribu bosquimana /Aise considera que estas nueces no saben bien y, por tanto, no las consume (Hitchcock y Ebert, 1984). De manera similar, las sociedades costeras del sur de Australia obtuvieron elevadas densidades de energía gracias a la pesca, mientras que en Tasmania no se han hallado restos de desechos de escamas de peces (Taylor, 2007).

Un ejemplo excelente de la importancia de la cultura frente a la construcción de modelos energéticos simplistas es la comparación que Lizot (1977) establece entre dos grupos cercanos de indios yanomami, en el norte de

la Amazonia. Un grupo vive rodeado de bosque y consume menos de la mitad de energía y proteína animal que el segundo, que, aunque posee las mismas habilidades y herramientas de caza, vive en un entorno menos rico en cerdos salvajes, tapires y monos. Según Lizot, los miembros del primer grupo eran más vagos: cazaban con poca frecuencia y en ocasiones preferían comer peor: «Durante una semana [...] los hombres no fueron a cazar ni una sola vez, simplemente recolectaron su alucinógeno favorito (*Anadenanthera peregrina*) y pasaron días enteros tomando drogas. Las mujeres se quejaron de que no había carne, pero los hombres hicieron oídos sordos» (Lizot, 1977: 512).

Esto representa un caso común de una variación importante en la energía proporcionada por la caza que no tiene relación ni con la disponibilidad de recursos (la presencia de animales), ni con el coste energético de la caza (con armas simples y prácticamente idénticas), sino que es únicamente una función de la predisposición hacia el trabajo. Otro ejemplo de acciones que no se ajustan a una explicación estrictamente energética proviene de un análisis del intercambio de carne entre tanzanos de la tribu hadza (Hawkes, O'Connell y Jones, 2001). La mejor explicación energética para el intercambio generalizado de carne de animales grandes es la reducción del riesgo inherente a la caza mayor, pero el intercambio entre hadzas tiene que ver sobre todo con la mejora de la reputación social de los cazadores como vecinos.

El estudio de unos pocos grupos de cazadores-recolectores del siglo XX muestra que la recolección de algunas raíces genera los mayores retornos netos de energía (30-40 unidades de energía alimentaria por unidad de energía invertida). Por el contrario, muchas incursiones de caza, sobre todo de pequeños mamíferos arbóreos y terrestres en selvas tropicales, suponen una pérdida neta de energía o una mera equivalencia (recuadro 2.7). Los retornos de recolección más habituales son de 10-20 veces, similares a los de la caza de grandes mamíferos. En muchos entornos ricos en biomasa, los retornos prehistóricos fueron mucho más elevados, lo que permitió un aumento gradual de la complejidad social.

En realidad, muchas sociedades de cazadores-recolectores alcanzaron niveles de complejidad propios de sociedades agrícolas posteriores. Tenían asentamientos permanentes, altas densidades de

población, almacenamiento de alimentos a gran escala, estratos sociales, rituales elaborados e incipientes cultivos. En Moravia, los cazadores de mamuts del Paleolítico superior tenían casas de piedra bien construidas, producían gran variedad de herramientas excelentes y podían cocer arcilla (Klima, 1954). En el sudoeste de Francia, la elevada complejidad social de algunos grupos durante el Paleolítico superior se vio favorecida por la influencia del clima atlántico, que dio lugar a veranos bastante fríos e inviernos excepcionalmente suaves, extendió el periodo de recolección e intensificó la productividad de la vegetación, que sostenía rebaños herbívoros más grandes que en cualquier otra región de la Europa periglacial (Mellars, 1985). La prueba más convincente de la complejidad de algunas culturas paleolíticas son sus notables tallas, esculturas y pinturas rupestres (Grayson y Delpech, 2002; French y Collins, 2015) (figura 2.3).

RECUADRO 2.7

El retorno de energía neto de la búsqueda de alimentos

Utilizo el método descrito en el recuadro 1.10 y asumo una menor estatura de los cazadores-recolectores prehistóricos y un peso medio adulto de solo 50 kg. El metabolismo basal habría requerido 6 MJ/día (250 kJ/h) y la supervivencia de los adultos en reposo 8 MJ/día (330 kJ/h). La recolección de plantas requería sobre todo trabajo ligero y moderado, mientras que la caza y la pesca podían exigir un esfuerzo ligero, moderado o alto. Las actividades típicas de caza y recolección requerían unas cuatro veces la tasa metabólica basal en hombres y cinco veces en mujeres (casi 900 kJ/h). Si restamos el consumo de energía mínimo para sobrevivir, el aporte neto de energía para la búsqueda de alimentos pudo ser de unos 600 kJ/h. La producción de energía corresponde simplemente al valor de la parte comestible de las plantas recolectadas y los animales cazados.

Las productividades más altas en sistemas complejos de caza y recolección estuvieron asociadas con la explotación de recursos

acuáticos (Yesner, 1980). El estudio de yacimientos mesolíticos en el sur de Escandinavia muestra que, después de agotar las reservas de grandes herbívoros, los cazadores posglaciales se convirtieron en pescadores, recolectores de marisco y cazadores de marsopas y ballenas (Price, 1991). Vivían en grandes asentamientos que solían ser permanentes e incluían cementerios. Las tribus pesqueras del Pacífico noroccidental tenían asentamientos de varios centenares de personas que vivían en casas de madera bien construidas. Las migraciones regulares de salmones garantizaban un recurso fiable y fácilmente explotable que podía almacenarse de manera segura (ahumado) para proporcionar más tarde una nutrición excelente. Gracias a su alto contenido en grasa (cerca del 15%), la densidad de energía del salmón (9,1 MJ/kg) es casi tres veces superior a la del bacalao (3,2 MJ/kg). El caso paradigmático de una alta densidad de población vinculada con la caza marítima es el de los inuit del noroeste de Alaska, cuyo retorno de energía neto con la caza de ballenas barbadas migratorias era de más de 2.000 (Sheehan, 1985) (recuadro 2.8).

Figura 2.3 Dibujos de animales realizados con carbón en una pared de la cueva de Chauvet, en el sur de Francia. Estos notables retratos se remontan a hace entre 32.900 y 30.000 años (Corbis).

El suministro de alimentos dependía de unos pocos flujos de energía estacionales y, por tanto, requirió de extensos y a menudo elaborados sistemas de almacenamiento. Las prácticas de almacenamiento incluían la conservación en permafrost, el secado y ahumado de mariscos, bayas y carnes, la acumulación de semillas y raíces, la preservación en aceite y la fabricación de embutidos, harinas y pasteles de nueces. El almacenamiento de alimentos a gran escala y largo plazo cambió la relación de los cazadores-recolectores con el tiempo, el trabajo y la naturaleza, y ayudó a estabilizar poblaciones más densas (Hayden, 1981; Testart, 1982; Fitzhugh y Habu, 2002). Es posible que el beneficio evolutivo más importante fuera la necesidad de planificar y «presupuestar» el tiempo. Este nuevo modo de

existencia impidió la movilidad frecuente e introdujo una forma diferente de subsistencia basada en la acumulación de excedentes. Con el tiempo, el proceso se retroalimentó: la voluntad de aprovechar una parte cada vez mayor del flujo de energía solar fue la base de una mayor complejidad social más adelante.

RECUADRO 2.8

Balleneros de Alaska

En menos de cuatro meses de caza costera de ballenas barbadas (cuyas rutas de migración recorrían la costa de Alaska), hombres a bordo de *umiaks* (barcos con una estructura de madera o huesos de ballena, cubiertos con piel de foca y tripulados por hasta ocho personas) acumulaban alimentos para asentamientos cuya población llegó a ser de casi 2.600 personas (Sheehan, 1985; McCartney, 1995). Las ballenas barbadas adultas más grandes pesan hasta 55 t, mientras que los especímenes jóvenes que solían cazarse tienen de media 12 t. La alta densidad de energía de la grasa de ballena (36 MJ/kg) y del *muktuk* (preparado a partir de piel y grasa de ballena y cuyo contenido en vitamina C es comparable al de la naranja) generó un retorno de energía neto de la caza de más de 2.000.

La explotación de las migraciones anuales de salmón por parte de las tribus costeras del Pacífico noroeste también generó retornos de energía excepcionalmente elevados —aunque inferiores al de la caza de ballenas—: la cantidad de peces que subían los ríos era tan alta que a menudo los pescadores podían simplemente recogerlos cerca de la orilla o utilizando barcos. Los elevados retornos de energía posibilitaron grandes asentamientos permanentes y una mayor complejidad social y creatividad artística (grandes tótems de madera). Con el tiempo, el crecimiento poblacional de estos asentamientos costeros se vio frenado por la necesidad de cazar otras especies marinas y la dificultad para encontrar materias primas para ropa, ropa de cama y equipos de caza.

Aunque nuestra comprensión de la evolución de los homínidos ha mejorado muchísimo durante las últimas dos generaciones, persiste un área clave de incertidumbre: a pesar de la popular reivindicación de

los beneficios de la «dieta paleolítica», lo cierto es que no hemos podido reconstruir la composición representativa del régimen de subsistencia preagrícola. Y no debería sorprendernos (Henry, Brooks y Piperno, 2014). Los restos vegetales del consumo de alimentos rara vez sobreviven durante decenas de miles de años y casi nunca durante millones, por lo que es extremadamente difícil cuantificar la proporción de alimentos vegetales en la dieta. Los huesos sobreviven con mayor facilidad, pero no tienen por qué estar relacionados con la ingesta de animales por homínidos, e incluso cuando se consigue distinguirlos, resulta imposible decir si los animales a los que pertenecían eran o no representativos de una determinada dieta.

Como señalan Pryor *et al.* (2013), la imagen comúnmente aceptada de los cazadores-recolectores del Paleolítico superior europeo como competentes cazadores de grandes mamíferos que habitan regiones con muy pocos árboles proviene de la difícil preservación de los restos de plantas en yacimientos antiguos. Su estudio demostró que se ha subestimado el potencial de dichos yacimientos para proporcionar restos macrofósiles de plantas consumidas por humanos y que «la capacidad de explotar alimentos vegetales pudo ser un elemento clave de la colonización exitosa de los fríos hábitats europeos» (Pryor *et al.*, 2013, 971). Y Henry, Brooks y Piperno (2014) analizaron microrremanentes vegetales (granos de almidón y fitolitos) en cálculos dentales y herramientas de piedra y concluyeron que tanto los humanos modernos como sus contemporáneos neandertales consumieron una gama amplia y parecida de alimentos vegetales, incluidos rizomas y semillas de césped.

Los cambios en la altura, la masa corporal y las características craneales (gracilización de la mandíbula) son indicadores indirectos de las dietas predominantes y podrían ser el resultado de una variedad de mezclas de alimentos. Los hallazgos de herramientas de piedra utilizadas para matar y cortar animales no pueden relacionarse con la ingesta media de carne per cápita durante periodos prolongados de tiempo, de tal manera que la evidencia directa de isótopos estables

(proporciones de $^{13}C/^{12}C$ y $^{15}N/^{14}N$) es el único indicador fiable de las fuentes de proteínas, sus niveles tróficos y su origen terrestre o marino. Además, permite distinguir la fitomasa sintetizada por las dos vías principales (C3 y C4) de los heterótrofos que se alimentan de esas plantas y conocer la composición básica de la dieta en su conjunto. Aunque estos estudios no pueden traducirse en patrones fiables de consumo medio de macronutrientes (carbohidratos, proteínas, lípidos), los datos de isótopos indican que durante el Gravetiense los animales fueron la principal fuente de proteína en la dieta de los europeos, con un 20% del total (más aún en sitios costeros) proveniente de especies acuáticas (Hublin y Richards, 2009).

Antes de abandonar la historia de la energía de los cazadores-recolectores, debo señalar que la caza y recolección de alimentos jugó un papel importante en todas las sociedades agrícolas tempranas. En Çatalhöyük, un gran asentamiento agrícola neolítico en la llanura de Konya que se remonta aproximadamente al 7200 a. C., los primeros agricultores tenían dietas dominadas por granos y plantas silvestres, pero las excavaciones muestran huesos de animales cazados que van desde grandes uros hasta zorros, tejones y liebres (Atalay y Hastorf, 2006). Y en Tell Abu Hureyra, en el norte de Siria, la caza siguió siendo una fuente crítica de alimentos durante al menos 1.000 años después del inicio de la domesticación de las plantas (Legge y Rowley-Conwy, 1987). En el Egipto predinástico (anterior al 3100 a. C.), el cultivo de trigo y cebada se complementaba con la caza de aves acuáticas, antílopes, cerdos salvajes, cocodrilos y elefantes (Hartmann, 1923; Janick, 2002).

ORÍGENES DE LA AGRICULTURA

¿Por qué algunos cazadores-recolectores comenzaron a cultivar la tierra? ¿Por qué estas nuevas prácticas se difundieron de manera tan amplia y por qué su adopción se produjo, en términos evolutivos, tan rápido? Podemos eludir estas preguntas espinosas utilizando el

argumento de Rindos (1984), según el cual la agricultura no tiene una causa única, sino que surgió de una multitud de interacciones interdependientes. Como dijo Bronson (1977: 44): «[La agricultura] es un sistema adaptativo complejo y polifacético y en los sistemas adaptativos humanos [...] no existen "causas" únicas y perfectamente eficientes». Sin embargo, muchos antropólogos, ecólogos e historiadores han tratado de identificar esas causas y existen un sinfín de publicaciones que ofrecen diversas teorías sobre el origen de la agricultura (Cohen, 1977; Pryor, 1983; Rindos, 1984; White y Denham, 2006; Gehlsen, 2009; Price y Bar-Yosef, 2011).

La existencia de pruebas abrumadoras sobre el carácter evolutivo de la innovación agrícola reduce las posibilidades. La explicación más convincente de los orígenes de la agricultura combina crecimiento demográfico y estrés ambiental. Es decir, reconoce que la transición al cultivo permanente tuvo que ver tanto con factores naturales como sociales (Cohen, 1977). Como durante el Paleolítico tardío el clima era demasiado frío y los niveles de CO_2 demasiado bajos, y como estas condiciones cambiaron con el calentamiento posterior, Richerson, Boyd y Bettinger (2001) defienden que la agricultura fue imposible durante el Pleistoceno e inevitable durante el Holoceno. Este argumento se ve reforzado por el hecho de que hace 10.000-5.000 años el cultivo evolucionó de manera independiente en al menos siete zonas situadas en tres continentes distintos (Armelagos y Harper, 2005).

En esencia, el cultivo es un esfuerzo realizado para garantizar un suministro adecuado de alimentos. Por consiguiente, el nacimiento de la agricultura podría explicarse perfectamente como un ejemplo más de imperativo energético. El rendimiento decreciente de la recolección y la caza condujo a la extensión gradual de una forma incipiente de cultivo en muchas sociedades de cazadores-recolectores. Ya hemos señalado que la caza, la recolección y el cultivo coexistieron durante periodos muy largos. Pero ninguna explicación sensata de los orígenes de la agricultura puede ignorar sus muchas ventajas sociales. El cultivo

sedentario fue un recurso eficiente para lograr que más personas pudieran vivir juntas: facilitó el crecimiento de las familias, la acumulación de posesiones materiales y la organización de la defensa y el ataque.

Orme (1977) llevó esta conclusión al límite al defender que la producción de alimentos pudo no ser importante como fin en sí mismo en el desarrollo de la agricultura. En cualquier caso, no hay duda de que la génesis y difusión de la agricultura tuvieron cofactores sociales críticos. Además, todas las explicaciones monocausales y centradas en la energía de los orígenes de la agricultura también se ven debilitadas por el hecho de que el retorno de energía neto de la agricultura temprana a menudo era inferior al de la recolección y la caza anteriores o concurrentes. Es decir, la agricultura temprana solía requerir más energía humana que la caza y la recolección. A cambio, ofrecía un suministro de alimentos más fiable y la posibilidad de alcanzar una mayor densidad de población. Esto explica por qué tantas sociedades de cazadores-recolectores interactuaron continuamente (y comerciaron) con grupos agrícolas vecinos durante miles (o al menos cientos) de años antes de adoptar sistemas de agricultura permanente (Headland y Reid, 1989).

No hubo un solo centro de domesticación a partir del cual se propagaran las plantas cultivadas y los animales productores de leche y carne. En el Viejo Mundo, la región más importante para el desarrollo de la agricultura no fue el Levante meridional, como se pensaba anteriormente, sino los tramos superiores de los ríos Tigris y Éufrates (Zeder, 2011). Esto significa que la producción de alimentos comenzó en los márgenes —y no en las áreas centrales— de las zonas climáticas óptimas. El registro botánico de Chogha Golan, en las estribaciones de los Zagros iraníes, proporciona la confirmación más reciente de esta tesis (Riehl, Zeidi y Conard, 2013): allí comenzó hace unos 11.500 años el cultivo de cebada silvestre (*Hordeum spontaneum*), y más adelante de trigo y lentejas silvestres.

Es importante insistir en que no existen divisiones o umbrales temporales claros entre la caza y recolección y la agricultura, ya que la verdadera domesticación de plantas y animales silvestres, que se caracteriza por la aparición de cambios morfológicos claramente identificables, vino precedida por periodos prolongados de manipulación. Por otro lado, y a pesar de lo que se pensaba anteriormente, la domesticación de plantas y animales se produjo de modo casi simultáneo y se normalizó con bastante rapidez (Zeder, 2011). Las primeras especies domesticadas de plantas fueron el trigo farro (*Triticum dicoccum*), el trigo escanda (*Triticum monococcum*) y la cebada (*Hordeum vulgare*) en Oriente Medio hace 11.500-10.000 años (figura 2.4), el mijo chino (*Setaria italica*) y la calabaza mexicana (distintas especies de *Cucurbita*) hace 10.000 años, el maíz (*Zea mays*) hace 9.000 años y el arroz (*Oryza sativa*) y la patata andina (*Solanum tuberosum*) hace 7.000 años (Price y Bar-Yosef, 2011). Los primeros animales domesticados fueron la cabra y la oveja, hace 10.500-9.000 años, seguidos del ganado vacuno y porcino.

Las dos principales explicaciones de la transición neolítica hacia la agricultura en Europa son la difusión por imitación (difusión cultural) y dispersión de población (difusión démica). La datación por radiocarbono de los restos de los primeros yacimientos neolíticos realizada por Pinhasi, Fort y Ammerman (2005) arrojó resultados consistentes con la predicción de una difusión démica que pudo partir del Levante septentrional y el área mesopotámica hacia el noroeste a un ritmo medio de 0,6-1,1 km/año. Esta conclusión está respaldada por la comparación de secuencias de ADN mitocondrial de esqueletos de cazadores-recolectores europeos tardíos, los primeros agricultores y europeos contemporáneos que muestra de manera convincente que los primeros agricultores no eran descendientes de cazadores-recolectores locales, sino que habían inmigrado al inicio del Neolítico (Bramanti *et al*., 2009).

Figura 2.4 Los primeros cereales domesticados. a-c. El trigo farro (*Triticum dicoccum*), el trigo escanda (*Triticum monococcum*) y la cebada (*Hordeum vulgare*) fueron los cimientos de los orígenes de la agricultura en Oriente Medio (Corbis).

La agricultura temprana solía ser itinerante (Allan, 1965; Spencer, 1966; Clark y Haswell, 1970; Watters, 1971; Grigg, 1974; Okigbo, 1984; Bose, 1991; Cairns, 2015) y alternaba periodos cortos de cultivo (1-3 años) con periodos de barbecho mucho más largos (una década o más). Aunque existían diferencias relacionadas con el ecosistema, el clima y los cultivos dominantes, las prácticas agrícolas eran muy parecidas entre sí y estaban claramente orientadas hacia la búsqueda del mínimo gasto de energía. El ciclo habitual comenzaba con la limpieza de la vegetación natural: su tala o quema solía ser suficiente para viabilizar el cultivo. Para minimizar los recorridos a pie, se crearon campos o huertos lo más cerca posible de los asentamientos. La opción preferida fue la eliminación del crecimiento secundario. Rappaport (1968), por ejemplo, descubrió que solo uno de los 381 campos de Tsembaga (Nueva Guinea) fue creado en bosques primarios. Algunas parcelas tuvieron que ser cercadas para evitar que las dañaran los animales. En ese caso, la tala de árboles para fabricar cercas exigía una abundante mano de obra. El nitrógeno

de las plantas solía perderse en la combustión, pero los nutrientes minerales enriquecían el suelo.

Los hombres hacían el trabajo pesado (algunos árboles tenían que ser cortados para fabricar cercas y, cuando no había buenas herramientas, la vegetación simplemente se quemaba), mientras que las mujeres se dedicaban principalmente al desmalezado y la cosecha. Como tenían rendimientos relativamente altos, los alimentos básicos fueron los cereales y los tubérculos (Rappaport, 1968). En todas las regiones cálidas se practicaron mucho la asociación de cultivos (sobre todo en campos de cultivo intensivo), el cultivo múltiple y la cosecha escalonada. La agricultura itinerante fue importante en todos los continentes, excepto en Australia. En América del Sur, su forma antigua (1000-500 a. C.) dejó huella en toda la cuenca del Amazonas en forma de *terra preta*: suelos oscuros de hasta dos metros de profundidad que contenían madera carbonizada y residuos de cultivos, desechos humanos y huesos (Glaser, 2007; Junqueira, Shepard y Clement, 2010). En América del Norte llegó hasta el norte de Canadá, donde el pueblo hurón cultivó maíz y frijoles en largos ciclos de rotación (35-60 años) que alimentaban a 10-20 personas/ha (Heidenreich, 1971).

En áreas de baja densidad de población y abundante disponibilidad de tierra, la agricultura itinerante fue una etapa clave de la secuencia evolutiva que va desde la caza y recolección hasta el cultivo permanente. La reducción de tierras disponibles, la degradación ambiental y la presión creciente a favor de cultivos más intensivos han ido reduciendo su importancia progresivamente. El retorno neto de energía fue muy variado. El retorno energético de la horticultura de los Tsembaga, en las tierras altas de Nueva Guinea, era de 16 (Rappaport, 1968). Otro estudio realizado en Nueva Guinea dio resultados de 6-10 (Norgan *et al*., 1974). El retorno de la cosecha de maíz de los kekchí (en Guatemala) era de 30 (Carter, 1969). La mayoría de retornos eran de 11-15 para cereales pequeños y 20-40 para los cultivos de raíces, plátanos y maíz, mientras que el retorno

más alto de algunas raíces y legumbres podía llegar a 70 (recuadro 2.9). Alimentar a una persona requería limpiar periódicamente 2-10 ha de terreno, con un área realmente cultivada de 0,1-1 ha/persona. Incluso cuando solo era moderadamente productiva, la agricultura itinerante sostuvo densidades de población superiores en un orden de magnitud a las de los mejores sistemas de caza y recolección.

En territorios en los que llovía muy poco o en los que no llovía durante largas temporadas, el cultivo fue imposible o poco productivo y el pastoreo nómada supuso una mejor alternativa (Irons y Dyson-Hudson, 1972; Galaty y Salzman, 1981; Evangelou, 1984; Khazanov, 2001; Salzman, 2004). De hecho, el pastoreo rotativo fue el fundamento energético de decenas de sociedades del Viejo Mundo, y, aunque algunas de ellas permanecieron pobres y aisladas por siempre, otras constituyen los invasores de larga distancia más temidos de la historia: los xiongnu estuvieron en conflicto con las primeras dinastías chinas durante siglos, mientras que la invasión mongola de 1241 llegó hasta las actuales Hungría y Polonia.

La cría de animales es una forma de conservación de presas, una estrategia para diferir cosechas cuyo coste de oportunidad es mayor para animales muy grandes, especialmente bóvidos (Alvard y Kuznar, 2001). Aunque el retorno energético de los animales grandes sea *a priori* mayor que el de los pequeños, la mayor tasa de crecimiento de ovejas y cabras acabó favoreciendo su cría. Los animales pueden convertir la hierba en leche, carne y sangre con un aporte notablemente bajo de energía humana (figura 2.5). El trabajo de los pastores se limitaba a pastorear a los animales, protegerlos de los depredadores, darles agua, ayudarles a parir, ordeñarlos regularmente y ocasionalmente construir cercas temporales y matar algún animal para comerlo. Las densidades de población de estas sociedades no sobrepasaron las de las sociedades de cazadores-recolectores (recuadro 2.10).

RECUADRO 2.9

Coste energético y densidad de población del cultivo itinerante

En este recuadro utilizamos el coste neto de energía para calcular el retorno de la agricultura itinerante. He asumido que el aporte de trabajo medio requiere 700 kJ/h. La producción de energía es igual a las cosechas comestibles. No he calculado las pérdidas relacionadas con el almacenamiento y cuidado de las semillas.

Poblaciones	Principales cultivos	Aporte de energía (horas)	Retorno de energía	Densidad de población (personas/ha)
Asia sudoriental	Tubérculos	2.000-2.500	15-20	0,6
Asia sudoriental	Arroz	2.800-3.200	15-20	0,5
África occidental	Mijo	800-1.200	10-20	0,3-0,4
Mesoamérica	Maíz	600-1.000	25-40	0,3-0,4
América del Norte	Maíz	600-800	25-40	0,2-0,3

Fuentes: Conklin (1957), Allan (1968), Carter (1969), Clark y Haswell (1970), Heidenreich (1971), Thrupp *et al.* (1997), y Coomes, Girmard y Burt (2000).

El pastoreo nómada dominó partes de Europa y Oriente Medio y grandes regiones de África y Asia durante milenios. En ocasiones convivió con distintas formas de agropastoreo seminómada, especialmente en partes de África donde la caza y la recolección siguieron siendo prácticas significativas. Algunos grupos tuvieron poco impacto más allá de su entorno inmediato, pues solían permanecer

rodeados por agricultores más productivos y depender del trueque con sociedades establecidas.

En cambio, otros grupos ejercieron una enorme influencia en la historia del Viejo Mundo a través de incursiones recurrentes y conquistas (temporales) de sociedades agrícolas (Grousset, 1938; Khazanov, 2001). Algunos pastores y agropastores puros han sobrevivido hasta el día de hoy (sobre todo en Asia Central, África Oriental y el Sahel), aunque su presencia es cada vez más marginal.

Figura 2.5 Pastor masái con su ganado (Corbis).

RECUADRO 2.10

Pastores nómadas

Helland (1980) evidenció la reducida mano de obra requerida en las sociedades de pastores al señalar el gran número de animales de grandes especies ganaderas gestionados por un solo pastor en África Oriental: hasta

100 camellos, 200 vacas y 400 ovejas y cabras. Khazanov (1984) también reporta números importantes para los pastores asiáticos: dos pastores montados para 2.000 ovejas en Mongolia y un pastor adulto y un niño para atender entre 400 y 800 reses en Turkmenistán. El atractivo de este bajo esfuerzo fue una de las razones clave para que muchos pastores se mostraran renuentes a convertirse en agricultores permanentes. Como resultado de ello, muchas sociedades nómadas convivieron con agricultores sedentarios durante generaciones y solo abandonaron sus rebaños después de sequías devastadoras o pérdidas sustanciales de hierba disponible.

La subsistencia en sociedades pastorales exigía un mínimo de 2,5-3 camellos, 5-6 cabezas de ganado vacuno o 25-30 cabras u ovejas por persona. Los masáis tradicionales poseían muchas más cabezas de ganado vacuno (13-16 per cápita) debido al requisito mínimo de la extracción de sangre, que se realiza perforando una vena yugular apretada y extrayendo 2-4 L de sangre cada 5-6 semanas. Durante los periodos de sequía era necesaria una manada de 80 reses para proporcionar sangre a una familia de 5-6 personas, esto es, 13-16 animales por persona (Evangelou, 1984). En cualquier caso, las densidades de población de los nómadas siempre fueron bajas en comparación con las de los agricultores sedentarios: entre 0,8 y 2,2 personas/km^2 y 0,03-0,14 reses/ha en África Oriental (Helland, 1980; Homewood, 2008).

3

AGRICULTURA TRADICIONAL

Los imperativos energéticos no son la única causa de la transición de la caza y recolección a la agricultura, pero la evolución de esta última puede verse como un esfuerzo continuo por aumentar la productividad de la tierra (el rendimiento energético digerible) con el fin de abastecer a poblaciones más grandes. Incluso dentro de este marco restringido, no deben dejarse de lado importantes consideraciones extraenergéticas, como un suministro adecuado de micronutrientes, vitaminas y minerales. Con todo, y debido a las dietas abrumadoramente vegetarianas de todas las sociedades agrícolas tradicionales, no resulta excesivamente simplista centrarse en la producción de energía digerible producida en cultivos de alimentos básicos en general y granos en particular.

Solo los granos combinan rendimientos relativamente altos (inicialmente solo 500 kg/ha y más adelante, en granjas tradicionales más intensivas, más de 2 t/ha) con altas proporciones de carbohidratos fácilmente digeribles y un nivel moderadamente elevado de proteínas (algunas, sobre todo el maíz, también poseen una cantidad significativa de lípidos). Su densidad de energía en la madurez (15-16 MJ/kg) es cinco veces mayor que la de los tubérculos frescos, mientras que su nivel de humedad una vez secados al aire libre es lo

suficientemente bajo como para permitir su almacenamiento a largo plazo en recipientes (en el hogar) y graneros (a gran escala). Los granos básicos también maduran lo suficientemente rápido (100-150 días en el caso de las variedades tradicionales) como para generar una mayor productividad agrícola mediante rotaciones anuales con otros cultivos (principalmente semillas oleaginosas y leguminosas de grano) o el doble cultivo de cereales.

Boserup (1965, 1976) caracterizó el vínculo entre la energía alimentaria y la evolución de las sociedades agrícolas como una cuestión de elección. Cuando un sistema agrícola dado alcanza su límite de productividad, la población puede decidir entre migrar, quedarse y estabilizarse, quedarse y empequeñecerse o adoptar una forma de agricultura más productiva. La última opción puede no ser necesariamente más atractiva o más probable que las demás y su adopción a menudo se pospone u ocurre a regañadientes, porque casi siempre requiere mayores entrantes de energía —generalmente trabajo humano y animal—. Una productividad más elevada permite un crecimiento poblacional cultivando la misma área —o incluso un área más pequeña—, pero el retorno de energía neto de un cultivo más intensivo puede no aumentar o incluso reducirse.

La resistencia a expandir la tierra cultivada de manera permanente (opción que implicaba mayores entrantes de energía, como la tala de bosques primarios, el drenaje de pantanos o la construcción de campos en terrazas) condujo a un uso muy tardío de tierras de poca calidad. Las aldeas de la Europa carolingia estaban superpobladas y sus suministros de grano eran crónicamente inadecuados, pero solo se crearon nuevos campos en áreas difíciles de cultivar en algunas regiones de Alemania y Flandes (Duby, 1968). La Europa medieval vio oleadas de campesinos alemanes desplazarse desde regiones occidentales densamente pobladas hacia nuevas tierras de cultivo en bosques o pastizales y matorrales de Bohemia, Polonia, Rumania y Rusia, tierras que los agricultores vecinos consideraban indeseables. Del mismo modo, China no inició la colonización del fértil pero frío

noreste (Manchuria) hasta el siglo XVIII, e incluso hoy el cultivo en las islas periféricas de Indonesia es mucho menos intenso que en Java, isla densamente poblada y altamente productiva. En realidad, pasar del barbecho regular y extensivo al cultivo anual y más tarde a la policultura requirió milenios en todo el mundo.

A pesar de numerosas diferencias en las variedades cultivadas y las prácticas agronómicas, todas las granjas tradicionales compartieron una misma base energética. Funcionaban gracias a la conversión fotosintética de la radiación solar y producían alimentos para las personas y los animales, desechos reciclados para renovar la fertilidad del suelo y combustibles para fundir los metales necesarios para fabricar herramientas rudimentarias de cultivo. En consecuencia, en principio la agricultura tradicional era totalmente renovable. En la práctica condujo a menudo al agotamiento de las reservas de energía disponibles, sobre todo al inicio, cuando se creaban nuevas tierras de cultivo mediante la tala generalizada de bosques primarios. En cualquier caso, toda la empresa se basaba en conversiones prácticamente inmediatas de flujos de energía solar (con retrasos típicos que podían ir desde los pocos meses necesarios para cosechar hasta varias décadas antes de la tala de árboles maduros).

Sin embargo, incluso cuando el cultivo reemplazaba pastizales y matorrales naturales (lo que implicaba una pérdida mucho menor de fitomasa almacenada), la renovabilidad no era garantía de sostenibilidad. Las malas prácticas agronómicas redujeron la fertilidad del suelo y causaron erosión y desertificación, lo que dio lugar a menores rendimientos e incluso al abandono de cultivos. En muchas regiones la agricultura tradicional progresó del cultivo extensivo al intensivo: su motor primario —los músculos humanos y animales— fue el mismo durante milenios, pero las prácticas de cultivo, las variedades cultivadas y la organización del trabajo sufrieron grandes transformaciones. De este modo, la historia de la agricultura tradicional está marcada tanto por la constancia como por el cambio.

La progresiva intensificación de la agricultura favoreció densidades de población más elevadas, pero también exigió mayores gastos de energía en actividades agrícolas directas y elementos de apoyo tan críticos como la excavación de pozos o la construcción de canales de riego, carreteras, sistemas de almacenamiento de alimentos y terrazas. A su vez, estas mejoras exigieron más energía para fabricar más y mejores herramientas y máquinas rudimentarias accionadas por animales domésticos, agua y viento. El cultivo intensivo dependía del trabajo animal (al menos para arar, que solía ser la tarea de campo que más energía exigía). Las Américas fueron la excepción más notable: los agricultores mesoamericanos y los incas —cultivadores de patata y maíz— no utilizaron nunca animales de tiro. Tener animales domésticos implicaba darles de comer y, por tanto, disponer de cultivos más intensivos capaces de producir alimento para los animales. Los animales también se emplearon con mucha frecuencia para otras tareas de campo, así como durante el proceso de trilla y molienda, y fueron indispensables para la distribución de alimentos por tierra. Su estabulación, alimentación y reproducción, así como la producción de arneses, herraduras y accesorios, introdujeron más complejidad y nuevas habilidades.

No obstante, no todos los avances hacia la agricultura intensiva exigieron tanta energía como el cultivo múltiple o policultura, que ejerció una presión recurrente sobre la mano de obra disponible durante los periodos de siembra y cosecha, aumentó la dependencia respecto a animales de tiro más fuertes (lo que llevó a cultivar todavía más tierra para producir sus alimentos) y requirió la construcción y el mantenimiento de canales de irrigación (que implicaban un esfuerzo consecuente y recurrente). Usando una analogía mecánica, podemos decir que los cambios que permitieron aprovechar una mayor proporción del potencial fotosintético disponible implicaron la apertura de compuertas (válvulas) críticas no energéticas que estaban, o bien acelerando los flujos existentes, o bien impidiendo *de facto* su conversión en fitomasa digerible.

Quizá el ejemplo más importante de este efecto sea la disponibilidad de nitrógeno, el macronutriente clave de las plantas. La rotación de cultivos de leguminosas fijadoras de nitrógeno y cereales y tubérculos aumentó la producción total de alimentos y al mismo tiempo trajo importantes beneficios agroecosistémicos. Del mismo modo, los avances en el diseño de dispositivos de riego y la adopción de nuevas variedades de cultivo y nuevos cultivares ayudaron a impulsar la productividad y las cosechas anuales. A su vez, la agricultura intensiva no solo trajo consigo beneficios energéticos (más alimento y pienso), sino que también contribuyó al avance de las civilizaciones preindustriales, pues exigía planificación e inversiones a largo plazo, una mejor organización del trabajo y mayor integración social y económica.

Por supuesto, no todas las formas de intensificación de cultivos requirieron una organización y supervisión centralizadas. Muchas familias y pueblos de agricultores aislados excavaron pequeños canales de riego o pozos poco profundos y construyeron pequeñas terrazas o campos elevados. Sin embargo, con el paso del tiempo el crecimiento continuo de estas actividades exigió una coordinación jerárquica y gestión supralocal. Y la necesidad de disponer de fuentes de energía más potentes —capaces de procesar grandes cantidades de granos y semillas oleaginosas para ciudades cada vez más pobladas— fue un estímulo clave para el desarrollo de los primeros sustitutos importantes de los músculos humanos y animales: el uso del agua y el viento para la molienda de granos y el prensado de semillas oleaginosas. El resultado de milenios de evolución agrícola fue una amplia variedad de modelos operativos y niveles de productividad, dentro de los límites de las prácticas agronómicas compartidas y los imperativos energéticos comunes.

Los principales puntos en común incluían operaciones básicas agrícolas, un dominio generalizado del cultivo de cereales y secuencias de ciclos de producción que en buena medida venían determinadas por las condiciones ambientales. Los cuatro principales pasos hacia la

intensificación de la agricultura tradicional fueron un uso más eficiente del trabajo animal, avances en los sistemas de riego, el aumento de la fertilización y las técnicas de cultivo múltiple y rotación de cultivos. A pesar de numerosas limitaciones ambientales y técnicas, la agricultura tradicional sostuvo densidades de población uno o varios órdenes de magnitud superiores a los de casi todas las sociedades de cazadores-recolectores. Además, generó de manera relativamente rápida un excedente de energía que permitió que un número pequeño pero significativo de adultos participara en un abanico cada vez mayor de actividades no agrícolas, conduciendo eventualmente al surgimiento de sociedades preindustriales altamente diversificadas y estratificadas. Los límites productivos de la agricultura tradicional solo desaparecieron con el empleo creciente de combustibles fósiles, una forma de «dopaje» energético que redujo la mano de obra agrícola a una pequeña fracción de la fuerza de trabajo total y permitió el surgimiento de las sociedades modernas de alto consumo de energía.

PUNTOS EN COMÚN Y PARTICULARIDADES

Los requisitos del cultivo impusieron un patrón general en la secuencia del trabajo de campo. El cultivo de variedades idénticas condujo a la invención o adopción de prácticas agronómicas, herramientas y máquinas sencillas muy similares entre sí. Algunas innovaciones (como la hoz y el mayal) llegaron temprano, se difundieron deprisa y no sufrieron casi ningún cambio durante milenios. Otros inventos (como el arado de vertedera de hierro y la sembradora) permanecieron anclados en sus regiones de origen durante mucho tiempo y experimentaron una mejora rápida una vez difundidos. Las herramientas y máquinas rudimentarias facilitaron las operaciones de campo —creando así una ventaja mecánica—, aceleraron e incrementaron la productividad, y permitieron que menos personas cultivaran más alimentos, de tal manera que el excedente de energía

resultante pudo invertirse en otras estructuras y actividades: sin hoz y arado no habría ni catedrales ni expediciones de descubrimiento.

A continuación repaso brevemente algunas operaciones de campo, herramientas y máquinas rudimentarias y luego describo el dominio de los granos de cereales y las particularidades de los ciclos de cultivo.

Trabajo de campo

La agricultura tradicional implicaba mucho trabajo duro, pero también conllevaba periodos prolongados relativamente poco exigentes y de descanso estacional. Implicaba un modo de vida muy diferente al de la movilidad casi permanente de la caza y recolección. La transición de la caza y recolección a la agricultura dejó un claro registro físico en nuestros huesos. El examen de restos óseos de casi 2.000 europeos cuyas vidas abarcan 33.000 años (desde el Paleolítico superior hasta el siglo XX) revela una reducción progresiva de la fuerza de flexión de los huesos de las piernas a medida que la población adoptó un estilo de vida cada vez más sedentario (Ruff *et al*., 2015). Este proceso se completó hace unos 2.000 años. Desde entonces la resistencia de los huesos de las piernas ha permanecido estable, a pesar de la mecanización casi total de la producción de alimentos en los últimos siglos. Esta observación confirma que el cambio de la caza y recolección a la agricultura —de la movilidad al sedentarismo— supuso un auténtico punto de ruptura en la evolución humana.

El ritmo del trabajo de campo en la agricultura tradicional venía determinado por imperativos ambientales. En *De agri cultura*, el compendio conocido sobre agricultura más antiguo del mundo, escrito en el siglo II a. C., Catón el Viejo dice: «Asegúrate de llevar a cabo todas las operaciones a tiempo, pues así funciona la agricultura: si te retrasas en una cosa, te retrasarás en todo lo demás». Durante miles de años la siembra se hizo a mano, pero las demás tareas de campo requerían herramientas —cuya variedad aumentó con el paso del tiempo—. Y aunque existen diseños de máquinas agrícolas muy

antiguas, estas solo comenzaron a difundirse de verdad durante la era moderna temprana (1500-1800).

La descripción de herramientas, implementos y máquinas agrícolas tradicionales puede encontrarse en libros de historia de la agricultura en regiones o países específicos que se citan más adelante en este capítulo, y con mayor detalle en volúmenes más especializados: White (1967) para el mundo romano, Fussell (1952) y Morgan (1984) para Reino Unido, Lerche (1994) para Dinamarca, Ardrey (1894) para Estados Unidos, y Bray (1984) para China. He utilizado todas estas fuentes para describir los implementos y las prácticas y avances de cultivo más importantes en las páginas siguientes. Abordaré los arneses de animales en la sección sobre la potencia de tiro tradicional.

En todas las culturas antiguas del Viejo Mundo, la secuencia comienza con el arado. Un tratado clásico chino dice que «ningún rey o gobernante puede prescindir de él». Su importancia capital también se refleja en la escritura antigua. Tanto los registros cuneiformes sumerios como los glifos egipcios tienen pictogramas para el arado (Jensen, 1969). El arado prepara el terreno para la siembra de manera mucho más profunda que la azada: rompe el suelo compactado, arranca la maleza y proporciona un suelo suelto y aireado en el que las semillas pueden germinar y prosperar. Los primeros arados —utilizados habitualmente después de 4000 a. C. en Mesopotamia— eran meros palos de madera puntiagudos con un mango.

Más tarde muchos de ellos se remataron con metal, pero durante siglos fueron ligeros y simétricos (depositaban tierra en ambos lados). Tales arados rudimentarios —que no hacían más que abrir un surco poco profundo para las semillas y dejar malas hierbas cortadas en la superficie— fueron el pilar de la agricultura griega y romana (*aratrum* en latín). En algunas regiones de Oriente Medio, África y Asia se utilizaron hasta bien entrado el siglo XX. A veces, en regiones muy pobres eran movidos por personas. Tal esfuerzo solo pudo ser preferible a la azada en suelos ligeros y arenosos (Bray, 1984). La adición de una vertedera fue con mucho la mejora más importante. La

vertedera guía el suelo arado hacia un lado, lo voltea (parcial o totalmente), entierra las malas hierbas cortadas y limpia el fondo del surco antes del siguiente giro. También permite labrar el campo en una única operación y no en dos, como requiere la azada. Las primeras vertederas eran piezas rectas de madera, pero antes del siglo I a. C. la dinastía Han introdujo placas de metal curvadas unidas al dental del arado (figura 3.1).

Los arados pesados de la Europa medieval tenían una vertedera de madera y una cuchilla que cortaba un borde del suelo en frente de la reja de hierro forjado. Durante la segunda mitad del siglo XVIII los arados occidentales aún conservaban pesadas ruedas de madera, pero incorporaron vertederas de hierro bien curvadas (figura 3.1). Este tipo de arado se hizo común en Europa y América del Norte con la llegada de acero barato, producido primero mediante el proceso Bessemer durante la década de 1860 y poco después —y en cantidades mucho mayores— en hornos Martin-Siemens (Smil, 2016) (figura 3.1). En muchos suelos el arado deja atrás terrones de tierra relativamente grandes que deben romperse antes de sembrar. La azada funciona, pero su uso es demasiado lento y laborioso. Por eso las antiguas culturas del arado utilizaron gradas: desde primitivas gradas de cepillo hasta una variedad de marcos de madera o metal en los que se fijaban clavijas de madera o discos o dientes de metal. A menudo se utilizaban gradas o rodillos invertidos para suavizar aún más la superficie.

Después de arar, gradar y nivelar, el suelo estaba listo para la siembra. Aunque en Mesopotamia se usaban sembradoras desde el 1300 a. C. y en la China Han arados de siembra mil años más tarde, la siembra a mano —que conllevaba muchos desperdicios y una germinación irregular— siguió siendo común en Europa hasta el siglo XIX. A finales del siglo XVI, inicialmente en el norte de Italia, comenzaron a difundirse sencillas sembradoras que arrojaban semillas a través de un tubo situado en un contenedor unido al arado. En poco tiempo muchas mejoras posteriores los convirtieron en complejas máquinas de siembra. El intercultivo solía realizarse utilizando la

azada. El estiércol y otros desechos orgánicos eran llevados al campo en carros, contenedores de madera o cubos transportados con varas al hombro (una práctica común en el este de Asia). Luego, los desechos eran vertidos o arrojados al campo.

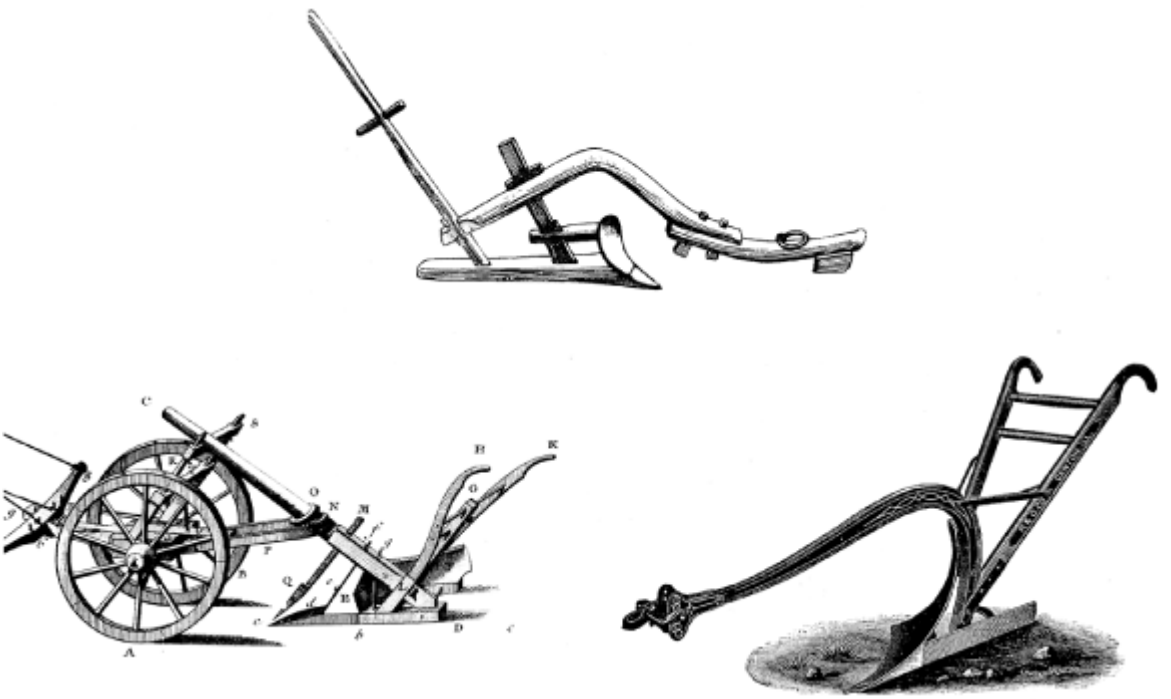


Figura 3.1 Evolución de arados de vertedera. El arado chino tradicional (arriba) tenía una vertedera pequeña pero suavemente curvada hecha de hierro fundido no fragmentado. El arado mediano europeo pesado, unido a un avantrén delantero (abajo a la izquierda), tenía una cuchilla puntiaguda delante de la reja para cortar raíces. El eficiente arado americano de mediados del siglo XIX (abajo a la derecha) fusionaba la reja y la vertedera en un triángulo de acero suavemente curvado. Fuentes: Hopfen (1969), Diderot y D'Alembert (1769-1772) y Ardrey (1894).

Las hoces fueron las primeras herramientas para cosechar que reemplazaron a los cortadores de piedra cortos y afilados que utilizaban muchas sociedades de cazadores-recolectores. También se han hallado grandes guadañas —con bordes cortantes de hasta 1,5 m de largo— en la Galia romana (Tresemer, 1996; Fairlie, 2011). Las hoces tienen bordes aserrados (en los diseños más antiguos) o lisos y cuchillas semicirculares rectas o ligeramente curvadas. Cortar con una hoz era lento y por eso se desarrolló el uso de guadañas —equipadas

con rastrillos para la siega del grano— para cosechar áreas más grandes (figura 3.2). Con todo, la hoz generaba menores pérdidas de grano que el amplio barrido de la guadaña —pues esta última aplastaba las espigas—, de tal manera que en Asia el uso de la hoz se mantuvo para la cosecha del arroz, que se rompe fácilmente. La segadora mecánica llegó a Estados Unidos y Europa a principios del siglo XIX (Aldrich, 2002). La cosecha se llevaba de vuelta a casa en gavillas situadas encima de la cabeza, alforjas colgadas en los costados de los animales o en varas a los hombros, y carretillas, carros o carretas empujados o arrastrados por personas o animales de tiro.

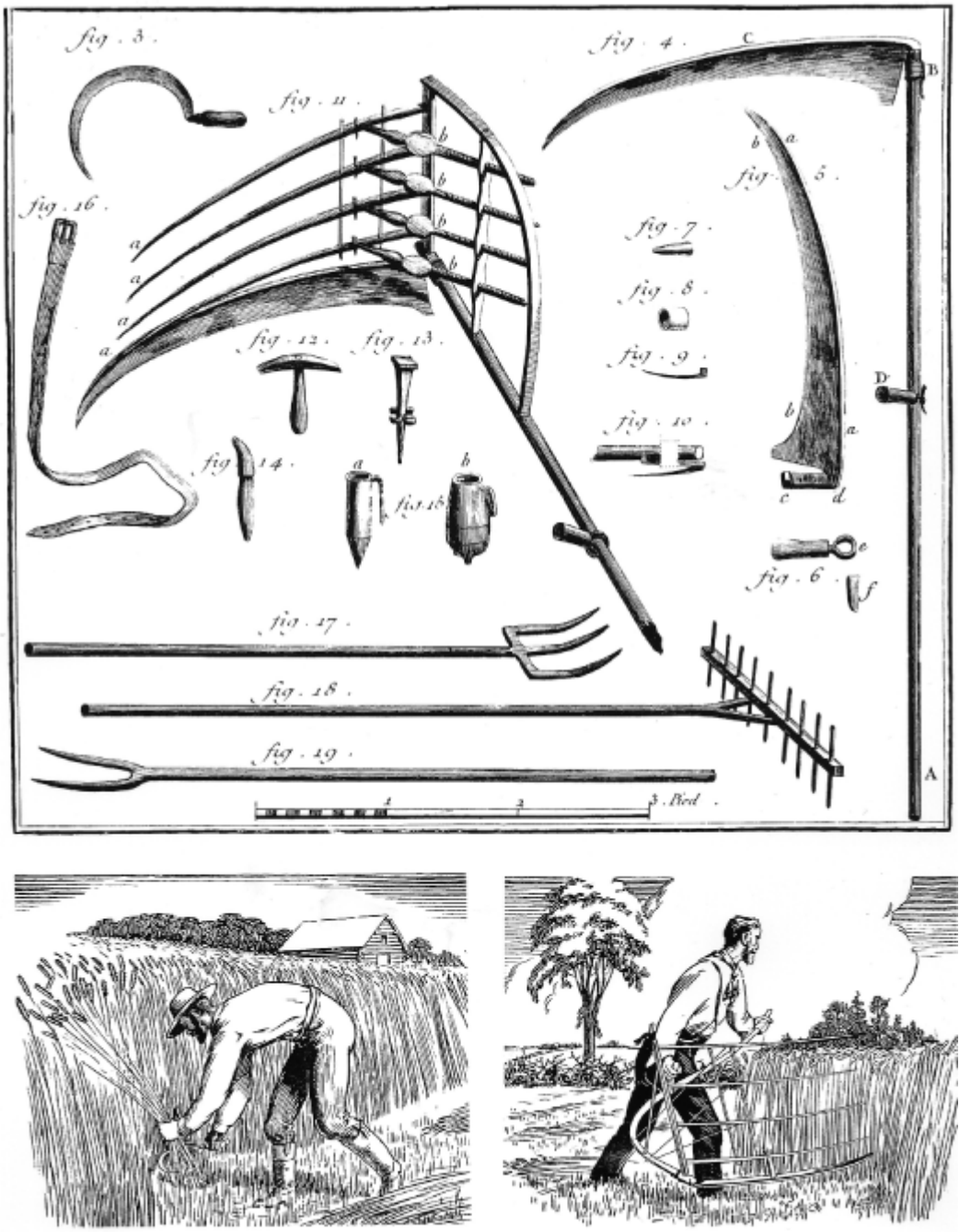


Figura 3.2 Hoces y guadañas representadas en la *Enciclopedia* (Diderot y D'Alembert, 1769-1772). La guadaña simple de la derecha se usaba para cortar la hierba y la guadaña con rastrillo (ligeramente curvada) para la cosecha de cereales. También se muestran herramientas para martillar (o enderezar) y afilar las guadañas, así como un rastrillo y horquillas. Las ilustraciones inferiores muestran la cosecha de cereales estadounidenses del siglo XIX con ayuda de una hoz y una guadaña con rastrillo.

Las labores de la cosecha exigían una cantidad considerable de energía. El grano se extendía y era golpeado con palos o flagelos en una era; las gavillas eran sacudidas contra rejillas o arrastradas a través de peines especiales. Se usaban animales para pisar el grano o arrastrar trineos o rodillos pesados sobre él. Antes de la adopción de ventiladores de manivela (*crank-turned fans*), la separación del grano, el polvo y la paja se realizaba manualmente con ayuda de cestas y tamices. La molienda también exigió un tedioso proceso manual hasta que se mecanizó con animales, agua y molinos de viento. El aceite —igual que el zumo de caña de azúcar— se extraía de las semillas con prensas manuales o movidas con animales.

El dominio de los granos

Aunque las granjas tradicionales cultivaban distintas variedades de granos, oleaginosas y plantas de fibra y alimentación de animales, con frecuencia la secuencia de tareas descrita anteriormente se correspondió con el cultivo de cereales. Junto con el arado, el predominio del cultivo de cereales es el segundo punto en común más evidente entre todas las granjas del Viejo Mundo. Las sociedades mesoamericanas sin arado dependían del maíz, mientras que los incas fueron una excepción parcial, ya que plantaron maíz en altitudes bajas, quinoa en el altiplano y muchas variedades de patata en altitudes elevadas y laderas pronunciadas (Machiavello, 1991). Para ello se basaron en el *chaquitaclla* o arado de pie, un arado que consiste en un poste de madera con una punta curva y afilada y una barra transversal que se empuja a pie para hacer un surco.

Muchos cereales solo tuvieron un alcance local o regional, como la quinoa inca —muy en boga en las dietas veganas occidentales actuales —, pero los principales géneros de granos básicos se difundieron gradualmente en todo el mundo desde sus áreas de origen. El trigo inició su expansión en Oriente Próximo, el arroz en el sudeste asiático, el maíz en Mesoamérica y el mijo en China (Vavilov, 1951; Harlan, 1975; Nesbitt y Prance, 2005; Murphy, 2007). La importancia de los

cereales tiene que ver con una combinación de ajustes evolutivos e imperativos energéticos. Los cazadores-recolectores recolectaban una amplia variedad de plantas y los tubérculos o las semillas —en función del ecosistema— proporcionaban la mayor parte de su energía alimentaria. En las sociedades agrícolas la opción de los tubérculos como alimento básico no era posible.

El contenido en agua de los tubérculos recién cosechados es demasiado alto para el almacenamiento a largo plazo en ausencia de controles eficaces de temperatura y humedad. Incluso si se supera este problema, su volumen requiere grandes espacios de almacenamiento para alimentar a poblaciones densamente pobladas situadas en latitudes norteñas (o altitudes elevadas) durante los meses de invierno. Las sociedades andinas que vivían a mucha altitud resolvieron el problema preservando las patatas como chuños, un alimento deshidratado producido por quechuas y aimaras mediante un proceso alterno de congelación, pisado y secado que puede almacenarse durante meses e incluso años (Woolfe, 1987). Los tubérculos son bajos en proteínas (habitualmente, una quinta parte de las que tienen los cereales: algunos trigos duros tienen hasta un 13% de proteínas y las patatas blancas un 2%). Las legumbres tienen el doble de proteínas que los cereales (un 20% los guisantes y 18-26% los frijoles y las lentejas), y la soja, más del triple (35-40%). Sin embargo, el rendimiento del cultivo de leguminosas es muy inferior al de los granos básicos: el rendimiento medio de los cereales en Estados Unidos fue de 2,5 t/ha en 1960 y 7,3 t/ha en 2013 (FAO, 2015a).

Así, la prevalencia de los cereales es una cuestión claramente energética: combinan un rendimiento alto, un buen valor nutricional (muchos carbohidratos y una cantidad importante de proteínas), una densidad de energía relativamente alta (unas cinco veces más que los tubérculos) y una humedad baja que los hace compatibles con el almacenamiento a largo plazo (en buenas condiciones de ventilación, no se estropean si contienen hasta un 14,5% de agua). El dominio de una especie o variedad en particular depende en buena medida de las

circunstancias ambientales —sobre todo la duración del periodo de vegetación, el tipo de suelo y la cantidad de agua disponible— y las preferencias de sabor. En cuanto al contenido energético total, todos los cereales son notablemente similares entre sí, con diferencias generalmente inferiores al 10% (recuadro 3.1).

Buena parte de la energía alimentaria de los cereales está en los carbohidratos, principalmente polisacáridos altamente digeribles (almidones). El aumento de la proporción de almidones en la dieta humana dio lugar a un notable proceso de adaptación de los perros —el primer animal que domesticamos—, cuya capacidad de digestión de almidones también aumentó en relación con la de los lobos. De hecho, este cambio supuso un paso crucial en la domesticación de la especie (Axelsson *et al*., 2013). El contenido proteínico de los cereales tiene un rango más amplio: menos del 10% para muchos cultivares de arroz, un 13% para el trigo duro de verano y hasta el 16% para la quinoa. Las proteínas tienen la misma densidad energética que los carbohidratos (17 MJ/kg), pero su principal función nutricional no es aportarnos energía, sino proveernos de los nueve aminoácidos esenciales cuya ingestión es necesaria para construir y reparar los tejidos corporales (OMS, 2002). No podemos sintetizar proteínas corporales sin consumir estos aminoácidos esenciales en alimentos vegetales y animales.

RECUADRO 3.1

Densidad energética y contenido en carbohidratos y proteínas de los principales cereales

Granos de cereales	Contenido energético (MJ/kg)	Carbohidratos (%)	Proteínas (%)
Trigo	13,5-13,9	70-75	9-13
Arroz	14,8-15,0	76-78	7-8

Maíz	14,7-14,8	73-75	9-10
Cebada	13,8-14,2	73-75	9-11
Mijo	13,5-13,9	72-75	9-10
Centeno	13,3-13,9	72-75	9-11

Fuentes: USDA (2011) y Nutrition Value (2015).

Todos los alimentos de origen animal y todos los hongos suministran proteínas perfectas (con proporciones adecuadas de los nueve aminoácidos esenciales), mientras que los cuatro cereales básicos (trigo, arroz, maíz, mijo) y otros cereales importantes (cebada, avena, centeno) son deficientes en lisina, y los tubérculos y la mayoría de legumbres poseen escasa metionina y cisteína. La proteína completa puede suministrarse incluso con las dietas vegetarianas más estrictas combinando alimentos con deficiencias particulares de aminoácidos. Todas las sociedades agrícolas tradicionales que han subsistido con dietas ampliamente vegetarianas dominadas por cereales han encontrado de forma independiente —y obviamente en ausencia de cualquier conocimiento bioquímico, ya que los aminoácidos y su función nutricional se descubrieron en el siglo XIX— una solución simple a este problema fundamental utilizando granos y legumbres en dietas mixtas.

En China, la soja (una de las pocas plantas alimenticias importantes que contiene proteína completa), las judías, los guisantes y los cacahuetes han complementado el mijo del norte y el trigo y el arroz del sur. En la India, la proteína proveniente del *dhal* (término genérico hindi para designar las legumbres, que incluye las lentejas, los guisantes y los garbanzos) siempre ha enriquecido las dietas basadas en trigo y arroz. En Europa, las combinaciones de legumbres y cereales más comunes se basaron en guisantes y judías y en trigo, cebada, avena y centeno. En África occidental, el maní y el caupí se

consumían junto con el mijo. Y en el Nuevo Mundo, el maíz y los frijoles no solo se comían juntos en una gran variedad de platos, sino que también se cultivaban habitualmente de manera intercalada en filas alternas en el mismo campo.

Esto significa que incluso las dietas puramente vegetarianas pueden proporcionar una ingesta adecuada de proteínas. Al mismo tiempo, casi todas las sociedades tradicionales valoraron mucho la carne, y allí donde se prohibió su consumo se recurrió a los productos lácteos (India) o el pescado (Japón) para consumir proteínas animales de alta calidad. El trigo contiene dos proteínas únicas no en el plano nutricional, sino debido a sus propiedades físicas (viscoelásticas). Las proteínas de gluten monoméricas (gliadina) son viscosas; las proteínas de gluten poliméricas (glutenina) son elásticas. Cuando se combinan con agua, forman un complejo de gluten suficientemente elástico para que la masa fermentada se eleve y suficientemente fuerte para retener las burbujas de dióxido de carbono formadas durante la fermentación de la levadura (Veraverbeke y Delcour, 2002).

Sin estas proteínas de trigo no habría pan con levadura, alimento fundamental de la civilización occidental. La levadura nunca fue un problema: *Saccharomyces cerevisiae* está presente de manera natural en las pieles de muchas frutas y bayas, y muchas cepas han sido domesticadas, surgiendo así cambios en la expresión de los genes y la morfología de las colonias (Kuthan *et al*., 2003). El predominio de los cereales en las dietas tradicionales hace que el balance energético de la producción de granos sea el indicador de productividad agrícola más revelador. Existen datos sobre los requisitos habituales de mano de obra agrícola y los costes de energía de una gran variedad de tareas individuales de campo y corral (recuadro 3.2).

Sin embargo, no es necesario tanto detalle para realizar una buena estimación de los balances de energía. Puede usarse un promedio representativo del coste de energía neto habitual en la agricultura tradicional. El requisito energético característico de las actividades moderadas es de 4,5 veces la tasa metabólica basal de los hombres y 5

la de las mujeres (1 y 1,35 MJ/h) (FAO, 2004). Si sustraemos las necesidades existenciales básicas respectivas, obtenemos un coste de energía neto laboral de 670 y 940 kJ/h. La media simple es de unos 800 kJ/h y más adelante la usaré como coste neto de la energía alimentaria de una hora media de trabajo en la agricultura tradicional. Del mismo modo, la producción bruta de granos se calcula multiplicando la masa cosechada por equivalentes energéticos apropiados (típicamente 15 GJ/t para granos con una humedad inferior al 15% y que, por ende, pueden almacenarse)

La ratio entre estas dos medidas permite calcular el retorno de energía bruto y, por tanto, la productividad de cada tarea agrícola crítica. El retorno de energía neto —que resta el cuidado de las semillas y las pérdidas de molienda y almacenamiento— era mucho menor. Los agricultores tenían que reservar una parte de cada cosecha para la siembra del año siguiente. La combinación de rendimientos bajos y desperdicio de semillas en la siembra a voleo pudo significar que un tercio o incluso la mitad de los cultivos de granos medievales fueran abandonados. Con el aumento de las cosechas estos porcentajes se redujeron gradualmente hasta menos del 15%. Antes de ser preparados (cocinados u horneados), la mayoría de cereales son molidos y en el proceso pierden una parte significativa de la masa del cereal integral (recuadro 3.3).

RECUADRO 3.2

Requisitos laborales y energéticos en la agricultura tradicional

Tareas	Personas/Animales	Horas por hectárea	Coste energético
Preparación del suelo			M-P
General	1/-	100-120	M-P
Suelo húmedo	1/-	150-180	P

Arado			M-P
Arado de madera	1/1	30-50	P
Arado de madera	1/2	20-30	P
Arado de acero	1/2	10-15	M
Allanado (con grada)	1/2	3-10	M
Siembra			L-M
A mano	1/-	2-4	M
Con sembradora	1/2	2-4	L
Deshierbe	1/-	150-300	M-P
Cosecha			M-P
Hoz (trigo)	1/-	30-55	P
Hoz (arroz)	1/-	90-110	P
Guadaña	1/-	8-25	P
Gavillado	1/-	8-12	M-P
Apilado (*shocking*)	1/-	2-3	P
Con cosechadora	1/2	1-3	M
Con atadora	1/3	1-2	M
Combinado	4/20	2	M
Trilla			L-P
Pisoteado	1/4	10-30	L
Trilla (con mayal)	1/-	30-100	P
Aventado	7/8	6-8	M

Nota: el trabajo ligero (L) consume menos de 20 kJ/min de energía alimentaria para un hombre adulto. El moderado (M) alcanza 30 kJ/min, y el pesado (P), hasta 40 kJ/min. Las tasas análogas para las mujeres son un 30% más bajas.

Fuentes: los rangos fueron compilados y calculados a partir de datos en Bailey (1908), Rogin (1931), Buck (1937), Shen (1951) y Esmay y Hall (1968). Los indicadores de coste de energía se estimaron a partir de estudios metabólicos revisados en Durnin y Passmore (1967).

RECUADRO 3.3

Molienda de cereales

La harina integral utiliza el grano completo, mientras que la harina de trigo blanco únicamente contiene el endospermo del grano (83% de su peso total) y reserva el salvado (14%) y el germen (2,5%) para otros usos (Wheat Foods Council, 2015). La producción de arroz blanco conlleva una pérdida de molienda aún mayor. La cáscara constituye el 20% de la masa del grano de arroz y su eliminación produce arroz integral. El salvado representa un 8-10% y su eliminación más o menos completa produce un arroz más o menos pulido (blanco) que solo representa un 70-72% del peso inicial del grano (IRRI, 2015).

Algunos testimonios de episodios de escasez de alimentos en Japón hacen referencia a personas obligadas a comer arroz integral, y, al empeorar las cosas, arroz integral mezclado con cebada y en última instancia solo cebada (Smil y Kobayashi, 2011). La molienda del maíz elimina la arista de la punta, la capa de salvado y el germen, dejando solo el endospermo (cerca del 83% del grano). La harina de maíz para hacer tortillas y tamales (masa de harina) se produce por nixtamalización o empapando la molienda húmeda de granos en una solución de cal (Sierra-Macías *et al*., 2010; Feast y Phrase, 2015). Esto afloja el casco de los granos y los ablanda al disolver la hemicelulosa, reduce la presencia de micotoxinas y aumenta la biodisponibilidad de la niacina (vitamina B3).

Las pérdidas de almacenamiento en granjas tradicionales —desde las infestaciones de hongos e insectos hasta la presencia de roedores que acceden a frascos y contenedores— representaban entre un pequeño porcentaje y más del 10% de granos comestibles. Como hemos señalado antes, los granos con hasta un 15% de humedad

pueden almacenarse durante largos periodos de tiempo, mientras que humedades más altas —especialmente combinadas con temperaturas más altas— proporcionan condiciones perfectas para la germinación de semillas y el crecimiento de insectos y hongos. Además, si el grano se almacena de manera incorrecta, puede ser consumido por los roedores. Incluso a mediados del siglo XVIII, una combinación de requisitos de siembra y pérdidas de almacenamiento podía significar una reducción de la producción bruta de energía de los granos europeos del 25%.

Ciclos de cultivo

La omnipresencia de los ciclos de cultivo anuales y el predominio del cultivo de cereales han oscurecido una sorprendente variedad de particularidades locales y regionales. Algunas de estas diferencias tuvieron orígenes culturales, pero la mayoría se desarrollaron como respuestas o adaptaciones al entorno. En particular, las condiciones ambientales determinaron la elección de los principales cultivos y, por consiguiente, la composición de las dietas típicas. También moldearon el ritmo de los ciclos agrícolas anuales, que influenciaban a su vez la gestión de la mano de obra agrícola. El trigo pudo extenderse de Oriente Medio a todos los continentes porque crece en muchos climas (desde semidesiertos hasta zonas templadas lluviosas; además, es el principal cultivar de alimentos en la zona templada entre los paralelos 30 y 60 N), muchas altitudes (desde el nivel del mar hasta 3.000 m) y muchos suelos, siempre que estén bien drenados (Heyne, 1987; Sharma, 2012).

En cambio, originariamente el arroz es una planta semiacuática de tierras bajas tropicales que crece en campos inundados hasta justo antes de la cosecha (Smith y Anilkumar, 2012). Su cultivo también se ha extendido mucho más allá del núcleo original, en el sur de Asia, pero los mejores rendimientos siempre se han dado en regiones tropicales y subtropicales lluviosas (Mak, 2010). La construcción y el mantenimiento de campos inundados estriados, la germinación de

semillas en viveros, el trasplante de plántulas y la provisión de riego subsidiario se suman a requisitos de mano de obra mucho más importantes que para el cultivo de trigo. El maíz, como el trigo, también prefiere suelos bien drenados, pero produce mejores cosechas en regiones con estaciones cálidas y lluviosas (Sprague y Dudley, 1988). Las patatas crecen mejor donde los veranos son frescos y la lluvia abundante.

Los ciclos agrícolas siempre se han regido por la duración de las estaciones de crecimiento en clima templado y la disponibilidad de agua en subtrópicos áridos y regiones monzónicas. En Egipto, las inundaciones del Nilo determinaron el ciclo anual de cultivo hasta la adopción del riego perenne durante la segunda mitad del siglo XIX. La siembra comenzaba tan pronto como el agua retrocedía (generalmente en noviembre) y no podía realizarse ningún trabajo de campo entre finales de junio (cuando las aguas empezaban a subir) y finales de octubre (cuando retrocedían rápidamente), con cosechas entre 150 y 185 días después (Hassan, 1984; Janick, 2002). Este patrón prevaleció sin grandes cambios hasta el siglo XIX.

El cultivo del arroz en Asia monzónica dependía de la lluvia de verano, abundante pero imprevisible, ya que solía retrasarse. En cultivos intensivos chinos, por ejemplo, las plántulas de arroz temprano eran trasplantadas de los viveros a los campos en abril. La primera cosecha (en julio) era inmediatamente seguida por el trasplante del arroz tardío, que se cosechaba al final del otoño, y esta segunda cosecha a su vez era seguida de una tercera cosecha invernal. En zonas templadas la doble cosecha funcionó bajo mucha menos presión. En Europa occidental, los cultivos de invierno se cosechaban entre cinco y siete meses después de la siembra, que tenía lugar en otoño. Eran seguidos por cultivos sembrados en primavera y que maduraban en cuatro o cinco meses. En regiones frías del norte en las que el suelo se descongela en abril, se sembraba una única cosecha anual a finales de mayo (para reducir el riesgo de heladas) y la cosecha

solo disponía de tres meses para madurar (antes del regreso de las heladas).

Un ritmo de cultivo determinado por el clima requiere una movilización y gestión del trabajo humano y animal irregular y cambiante. Las regiones con una única cosecha anual, como el norte de Europa y las llanuras de América del Norte, permanecían inactivas durante muchos meses en invierno. Por supuesto, cuidar de los animales domésticos era una tarea continua, pero aun así dejaba mucho tiempo libre, y parte de ese tiempo libre se dedicó al trabajo artesanal doméstico, la reparación de equipos agrícolas o la construcción. En el norte de China, donde el invierno es más corto, muchos días de inactividad se dedicaban al mantenimiento y la extensión de las obras de riego.

El arado y la siembra requerían algunas semanas de trabajo duro en primavera, seguidas de meses de rutina menos exigente, aunque el desbrozado de los arrozales podía ser difícil. La cosecha era la tarea más laboriosa y el arado de otoño podía extenderse durante un periodo muy largo. Allí donde climas menos extremos permitieron la siembra de una cosecha de invierno (Europa occidental, las llanuras del norte de China y buena parte del este de América del Norte) había dos o tres meses entre la cosecha de verano y la de invierno. Por el contrario, en países con una distribución de lluvias mucho menos uniforme, y especialmente en el Asia monzónica, los periodos para realizar tareas de campo eran muy limitados. La puntualidad en la siembra y la cosecha resultaba especialmente crítica. Un retraso de solo una semana respecto al periodo óptimo de siembra podía reducir el rendimiento de un modo sustancial. La cosecha excesivamente temprana de cereales exigía un secado intensivo en mano de obra debido a la elevada humedad, mientras que un pequeño retraso podía causar pérdidas debido a la rotura de mazorcas demasiado maduras.

Antes de la introducción de la segadora y la atadora, la recolección manual de cereales era la tarea que más tiempo consumía: requería entre tres y cuatro veces más tiempo que el arado y limitaba

fuertemente el área máxima que una sola familia podía manejar. Cuando un cultivo tenía que cosecharse rápidamente para poder plantar el siguiente, la demanda de mano de obra se disparaba. Un viejo proverbio chino dice: «Cuando el mijo y el trigo están maduros, incluso las niñas tienen que salir a ayudar». Buck (1937) cuantificó este requisito de mano de obra en sus exhaustivos estudios sobre la agricultura tradicional china: en el área de doble cultivo, la siembra y la cosecha (entre marzo y septiembre) movilizaban un 94-98% de la mano de obra disponible. En algunas partes de la India el pico de trabajo de verano, que duraba dos meses, requería más del 110% e incluso el 120% de la mano de obra realmente disponible. En otras partes de Asia monzónica la situación era similar (Clark y Haswell, 1970). Este cuello de botella energético se superaba trabajando duro durante incontables horas o con ayuda de mano de obra migrante.

El uso de mano de obra animal —limitado en muchas granjas a las tareas de campo más exigentes— era aún más desigual. Por ejemplo, los periodos de mayor trabajo de los búfalos de agua del sur de China eran dos meses de siembra, allanado (con grada) y aventado al inicio de la primavera, seis semanas de cosecha en verano y un mes de preparación del campo (arado y rastreado de nuevo) para la cosecha de invierno, es decir, 130-140 días al año, menos del 40% del tiempo (Cockrill, 1974). En los regímenes de cultivo único del norte de Europa, los caballos de tiro solo realizaban 60-80 días de duro trabajo de campo durante el arado (en otoño y primavera) y la cosecha de verano. Eso sí, casi todos los animales también se utilizaban para el transporte. Un día de trabajo medio implicaba entre cinco horas de trabajo para los bueyes de muchas regiones de África y más de diez para los búfalos de agua en los arrozales asiáticos y los caballos durante la cosecha en Europa y América del Norte.

EL CAMINO HACIA LA INTENSIFICACIÓN DE LA AGRICULTURA

La búsqueda de mejores rendimientos tuvo éxito gracias a tres avances esenciales. El primero fue un reemplazo parcial del trabajo humano por trabajo animal. En el cultivo del arroz esto eliminó el trabajo humano más exhaustivo, pues la azada fue reemplazada por arado profundo con búfalos de agua. En la agricultura de secano la mano de obra animal reemplazó la mano de obra humana y aceleró considerablemente muchas tareas de campo y granja, liberando tiempo para que las personas realizaran otras actividades productivas o trabajaran menos horas. Este cambio de motor primario hizo algo más que acelerar y facilitar el trabajo: también mejoró la calidad del arado, la siembra y la trilla. En segundo lugar, el riego y la fertilización moderaron —cuando no eliminaron por completo— la principal restricción sobre la productividad de los cultivos: la escasez de agua y nutrientes. Por último, el uso de una mayor variedad de cultivos —mediante cultivos múltiples o rotaciones— hizo que la agricultura tradicional fuera más resiliente y productiva.

Dos dichos populares chinos reflejan la importancia de la eliminación de estas restricciones y la diversificación de la producción: «Que haya cosecha depende del agua; cuán grande sea depende del fertilizante» y «Planta mijo tras mijo y terminarás llorando». El uso de animales de tiro fue un avance energético fundamental, con implicaciones más allá del cultivo y la cosecha. Los animales de tiro se volvieron indispensables para la fertilización (como fuente de nutrientes en forma de estiércol y fuerza motriz para distribuirlos en el campo). En muchos lugares también contribuyeron al riego. Disponer de un motor primario más potente y un mejor suministro de agua y nutrientes también trajo consigo más cultivos múltiples y rotaciones de cultivos. A su vez, estos avances permitieron alimentar y fortalecer a un mayor número de animales. En definitiva, las tres vías de intensificación de la agricultura siempre estuvieron unidas por bucles de retroalimentación positiva.

Animales de tiro

La domesticación de los animales ha dado como resultado muchas razas de trabajo con características distintivas y pesos que abarcan un orden de magnitud entre 100 kg para burros pequeños y poco más de 1.000 kg para los caballos de tiro más grandes. Los bueyes indios pesaban menos de 400 kg y el ganado vacuno italiano Romagnola o Chianina podía pesar el doble fácilmente (Bartosiewicz *et al*., 1997; Lenstra y Bradley, 1999). Muchos caballos de Asia y buena parte de Europa eran ponis de menos de 14 manos de alto y un peso no superior al de un buey asiático. La mano es una medida tradicional inglesa que equivale a 10,16 cm. La altura del animal se medía desde el suelo hasta su cruz (la cresta situada entre los omóplatos, debajo del cuello y la cabeza). Los caballos romanos medían 11-13 manos. Las razas europeas más pesadas de la era moderna temprana —el brabante belga, el Boulonnais y el percherón franceses, el Clydesdale escocés, el Suffolk Punch y el Shire ingleses, el Rheinlander alemán y el Vladimir ruso— se acercaban e incluso superaban las 17 manos de altura y los 1.000 kg de peso (Silver, 1976; Oklahoma State University, 2015). El peso de los búfalos de agua podía variar entre 250 y 700 kg (Cockrill, 1974; Borghese, 2005).

Las granjas tradicionales usaban animales para muchas tareas de campo y corral, pero sin duda la actividad en la que tuvieron un mayor impacto fue el arado (Leser, 1931). La fuerza de tracción de los animales de tiro suele ser más o menos proporcional a su peso. Otras variables que influencian su rendimiento real son el sexo, la edad, la salud y la experiencia del animal, la eficiencia del arnés y las condiciones del suelo y el terreno. Como todas estas variables pueden variar bastante (valga la redundancia), es preferible resumir la fuerza útil de las especies comunes de trabajo en términos de rangos típicos (Hopfen, 1969; Cockrill, 1974; Goe y Dowell, 1980). La potencia de tiro típica de un animal es de un 15% de su peso corporal, aunque en caballos puede alcanzar un 35% durante esfuerzos breves (2 kW), e incluso más durante esfuerzos límite de solo unos segundos (Collins y Caine, 1926). La combinación entre peso elevado y velocidad

relativamente alta hace que los caballos sean los mejores animales de tiro, aunque muchos caballos no podían trabajar de manera continuada a razón de un caballo de fuerza (745 W), y generalmente suponían 500-850 W (recuadro 3.4, figura 3.3).

Los requisitos de tiro reales variaron mucho en función de la tarea (la tarea más pesada era el arado y la más liviana, el rastreado) y el tipo de suelo (los suelos arcillosos pesados eran los más exigentes; los suelos arenosos lo eran mucho menos). El arado superficial (con una única reja de arado) y el corte de la hierba necesitaban una tracción de 80-120 kg; el arado profundo, de 120-170 kg; y una segadora-atadora mecánica, de 200 kg. Bastaban un par de caballos normales para hacer todas estas tareas. Un par de bueyes, en cambio, tenía muchas dificultades para arar o cosechar con una segadora. Al mismo tiempo, los imperativos mecánicos favorecían el uso de animales más pequeños: en igualdad de condiciones, su cuerda de tracción es casi paralela a la dirección de la tracción, lo que resulta en una mayor eficiencia, y al arar, una cuerda de tracción más baja también reduce la elevación del arado, facilitando el trabajo de guía del labrador. Los animales más ligeros también suelen ser más ágiles y, por tanto, compensan su falta de peso con su tenacidad y resistencia.

RECUADRO 3.4

Peso, tracción, velocidad de trabajo y fuerza característicos de los animales domésticos

Animales	Peso (kg)		Tracción (kg)	Velocidad (m/s)	Fuerza (W)
	Rangos comunes	Rangos grandes			
Caballos	350-700	800-1.000	50-80	0,9-1,1	500-850
Mulas	350-500	500-600	50-60	0,9-1,0	500-600
Bueyes	350-700	800-950	40-70	0,6-0,8	250-550
Vacas	200-400	500-600	20-40	0,6-0,7	100-300
Búfalos	300-600	600-700	30-60	0,8-0,9	250-550
Burros	200-300	300-350	15-30	0,6-0,7	100-200

Fuentes: Hopfen (1969), Rouse (1970), Cockrill (1974) y Goe y Dowell (1980).

La capacidad de tiro solo pudo traducirse en un rendimiento efectivo mediante el uso de arneses (Lefebvre des Noëttes, 1924; Haudricourt y Delamarre, 1955; Needham, 1965; Spruytte, 1983; Weller, 1999; Gans, 2004). La tracción debe transferirse al elemento que trabaja —la reja del arado o el borde de la segadora— mediante un engranaje que permita su transmisión eficiente y el control humano de los movimientos del animal. Puede parecer muy sencillo, pero los primeros arneses tardaron mucho en aparecer. Los primeros animales de tiro (bueyes y vacas) utilizaron yugos: barras de madera rectas o curvas sujetadas a los cuernos o el cuello del animal.

El arnés mesopotámico más antiguo (utilizado sobre todo con animales fuertes y de cuello corto y que más adelante fue común en España y América Latina) fue el yugo de doble cabeza, fijado en la parte anterior o posterior de la cabeza (figura 3.4). Era un arnés primitivo: una simple viga larga de madera cuyas fijaciones de cuello (conocidas como camellas) podían asfixiar a los animales durante las labores más pesadas y cuyo ángulo de tracción era excesivamente

elevado. Además, ambos animales debían tener exactamente la misma altura para evitar la asfixia de uno de ellos, e incluso cuando bastaba un único animal para una tarea liviana era necesario utilizar dos. En algunas regiones de Europa, como el este del Báltico o el sudoeste de Alemania, se utilizaron yugos individuales mucho más cómodos. Este tipo de yugo fue común en todo el este asiático y también en Europa Central (figura 3.4). En África, Oriente Medio y el sur de Asia se utilizaron yugos de doble cuello.

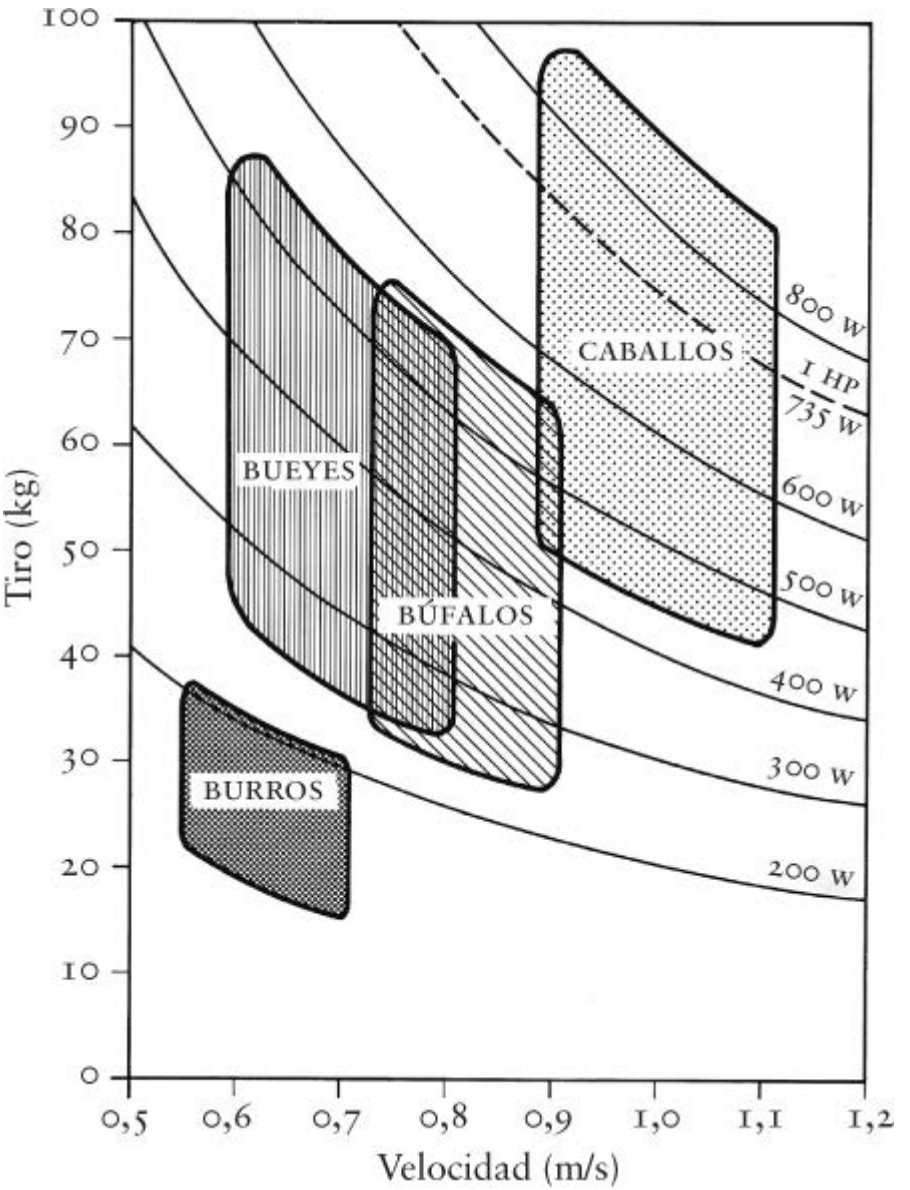


Figura 3.3 Comparación entre capacidades de tiro que muestra la clara superioridad de los caballos. Creado con datos de Hopfen (1969), Rouse (1970) y Cockrill (1974).

Los caballos son los animales de tiro más potentes. A diferencia del ganado vacuno, cuya masa corporal se divide a partes iguales entre la parte delantera y la trasera, la parte delantera de los caballos es notablemente más pesada que la trasera (en una proporción aproximada de 3:2), de tal manera que aprovechan mejor el movimiento inercial (Smythe, 1967). Excepto en suelos pesados y

húmedos, los caballos pueden trabajar en el campo de manera constante a velocidades de 1 m/s, un 30-50 % más rápido que los bueyes. La tracción máxima de una pareja de caballos pesados durante dos horas puede casi doblar la de las mejores parejas de ganado. Los caballos más grandes pueden trabajar durante periodos cortos a una potencia de 2 kW (más de tres caballos de fuerza estándar). En cambio, en los trópicos es mejor el ganado jorobado (cebúes) porque regula mejor el calor y es menos susceptible a las garrapatas. Los búfalos de agua prosperan en los trópicos húmedos porque convierten el forraje más eficientemente que el ganado y pueden pastar plantas acuáticas estando completamente sumergidos.

Las imágenes más antiguas que existen de caballos de tiro no los muestran trabajando en campos, sino tirando de carros ceremoniales ligeros o de guerra. Durante la mayor parte de la Antigüedad, los caballos de tiro fueron enganchados con un yugo dorsal (Weller, 1999). El yugo dorsal era un dispositivo bifurcado de madera o metal que se colocaba detrás de la cruz del animal, se sostenía con una correa de pecho y se sujetaba a ambos lados del yugo y una cincha (una correa que recorre la espalda y el vientre del animal). La reconstrucción errónea del arnés romano por Lefebvre des Noëttes (1924) condujo a la conclusión equivocada —aunque ampliamente aceptada durante décadas— de que fue un arreglo muy ineficiente debido a que el collar de pecho tendía a subir y ahogar al animal (recuadro 3.5).

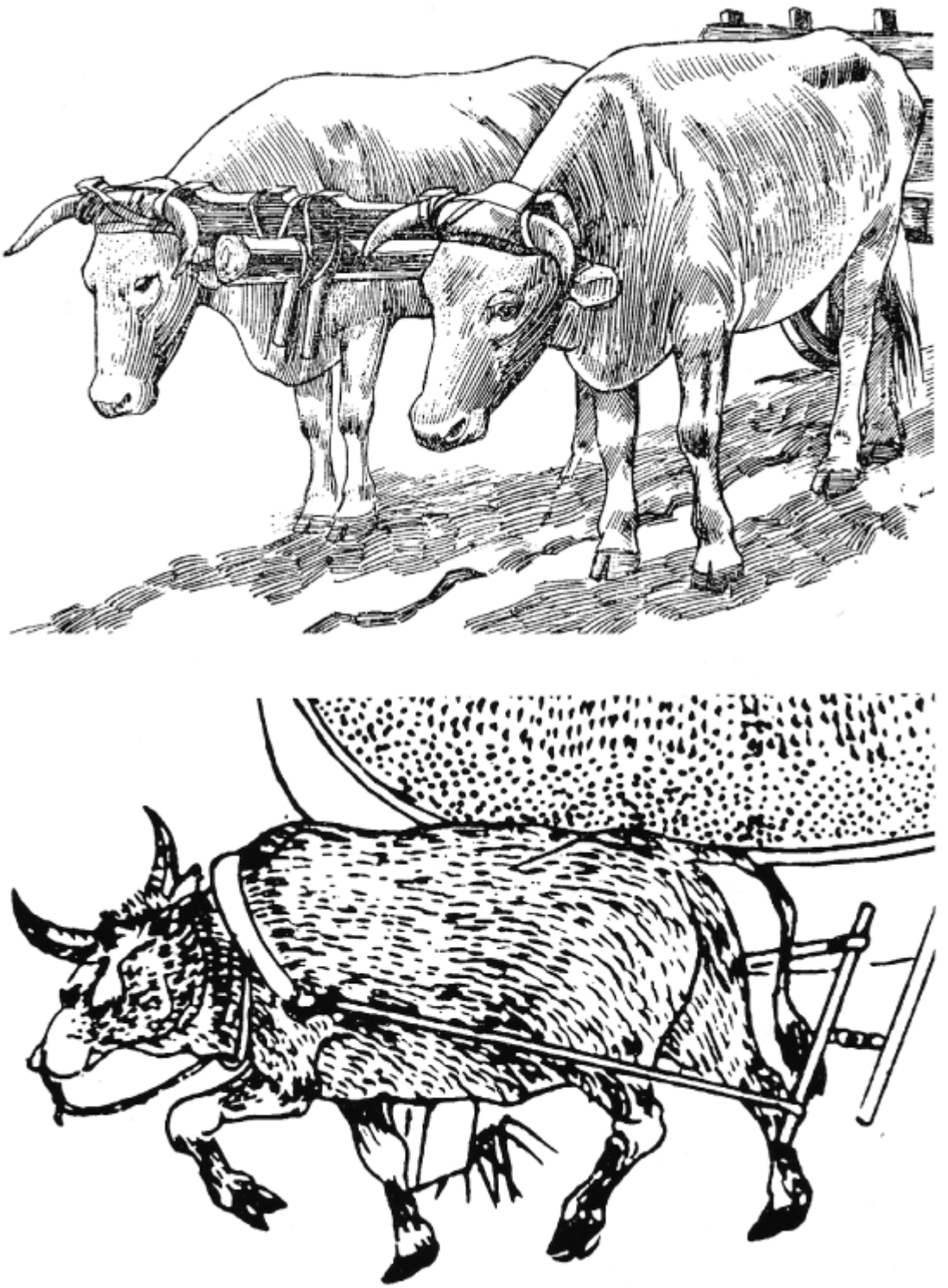


Figura 3.4 El yugo de cabeza o cornal fue el primer —y bastante ineficiente— arnés para bueyes de tiro. El yugo de cuello se convirtió en la herramienta dominante para utilizar la fuerza de tiro animal en todo el Viejo Mundo. Adaptado de Hopfen (1963) y de una ilustración de la dinastía Ming tardía (1637).

El punto de tracción del arnés de pechera, introducido en China al principio de la dinastía Han, se hallaba demasiado alejado de los músculos pectorales más potentes del animal (figura 3.5). A pesar de ello se extendió por toda Europa, llegando a Italia en el siglo V (probablemente a través del pueblo ostrogodo) y al norte del continente trescientos años después. Fue necesario otro invento chino para hacer de los caballos los mejores animales de tiro. El arnés de collera se usó por primera vez en China quizá ya en el siglo I a. C. como un soporte blando para el yugo duro. Gradualmente se transformó en un único componente. Los frescos de Donghuang nos muestran su diseño rudimentario en el siglo V. La evidencia filológica sugiere que en el siglo IX ya había llegado a Europa, donde su uso se generalizó en los tres siglos siguientes. El diseño de la collera no sufrió grandes cambios hasta que los caballos fueron reemplazados por máquinas, más de setecientos años después. De hecho, todavía se usa —aunque de manera cada vez menos frecuente— en caballos de tiro en China.

La collera estándar consiste en un único marco de madera (más tarde también de metal) ovalado y forrado para un ajuste cómodo sobre los hombros del caballo, a menudo con una almohadilla separada debajo. Las trabas están conectadas a los tirantes por encima de los omóplatos del caballo (figura 3.6). La brida —una broca de metal en la boca del animal unida a las riendas y apuntalada por un cabezal— permite controlar el movimiento del caballo. La collera proporcionaba un ángulo de tracción bajo muy eficiente y permitía el despliegue de los poderosos músculos del pecho y los hombros del animal y, por consiguiente, un mayor esfuerzo. También permitía la formación de grupos de animales en una o dos filas para labores excepcionalmente pesadas.

RECUADRO 3.5

Arneses y potencia de tiro

Durante décadas muchos textos han insistido en que el antiguo arnés de collar y barriguera era inadecuado para tareas de campo pesadas debido a su punto de tracción demasiado elevado y el efecto de asfixia provocado por la correa en la garganta. Esta conclusión se basaba en experimentos con un arnés reconstruido realizados en 1910 por un oficial francés, Richard Lefebvre des Noëttes (1856-1936), y publicados en 1924 en su libro *La force motrice à travers les âges*. La tesis de Lefebvre des Noëttes fue aceptada no solo por muchos clasicistas, sino también por tres destacados historiadores de la técnica del siglo xx, Joseph Needham (1965), Lynn White (1978) y Jean Gimpel (1997).

Sin embargo, se basaban en una reconstrucción equivocada: los experimentos realizados por Jean Spruytte durante la década de 1970 con un arnés debidamente reconstruido (colocado directamente detrás de la cruz y sujeto con correas en el pecho) no causaron asfixia, ni siquiera cuando dos caballos tiraban de una carga de casi 1 t (Spruytte, 1977). Esto refutó la idea de que «las culturas clásicas estuvieron "bloqueadas" por un sistema defectuoso de enganche de animales» (Raepsaet, 2008: 581). No obstante, en sus pruebas Spruytte utilizó un carro ligero del siglo XIX (mucho más ligero que un carro romano) y, por tanto, incluso si se ignora la diferencia en el tamaño del caballo, sus pruebas no replicaron completamente las condiciones habituales de hace dos milenios. En cualquier caso, debido al límite de peso (500 kg) de los carros tirados por caballos establecido en el Código Teodosiano (438 d. C.), «parece seguro que los romanos conocían la angustia que causaba tirar de cargas pesadas en los caballos» (Gans, 2004: 179).

La eficiencia del arnés no era la única condición necesaria para el buen rendimiento de los caballos y, por consiguiente, su introducción no causó ninguna revolución agrícola (Gans, 2004). Los caballos que trabajaban más duro eran alimentados con grano, lo que requería un ciclo de cultivo, y además necesitaban un arnés y herraduras relativamente caros, mientras que los bueyes, más débiles y lentos, podían alimentarse con paja y engancharse a bajo coste. Las herraduras son placas de metal angostas en forma de U que se ajustan al borde de la pezuña y se sujetan con clavos clavados en la pared insensible de la misma (figura 3.6). Su uso evitó el desgaste excesivo de las pezuñas blandas del animal y mejoró su tracción y resistencia. Esto

era especialmente importante en el clima fresco y húmedo del oeste y el norte de Europa. Los griegos no usaban herraduras: metían las pezuñas en sandalias de cuero llenas de paja. Los romanos conocían las herraduras (utilizaban *soleae ferreae* que se abrochaban con una especie de clips y cordones), pero estas solo se volvieron habituales a partir del siglo IX.

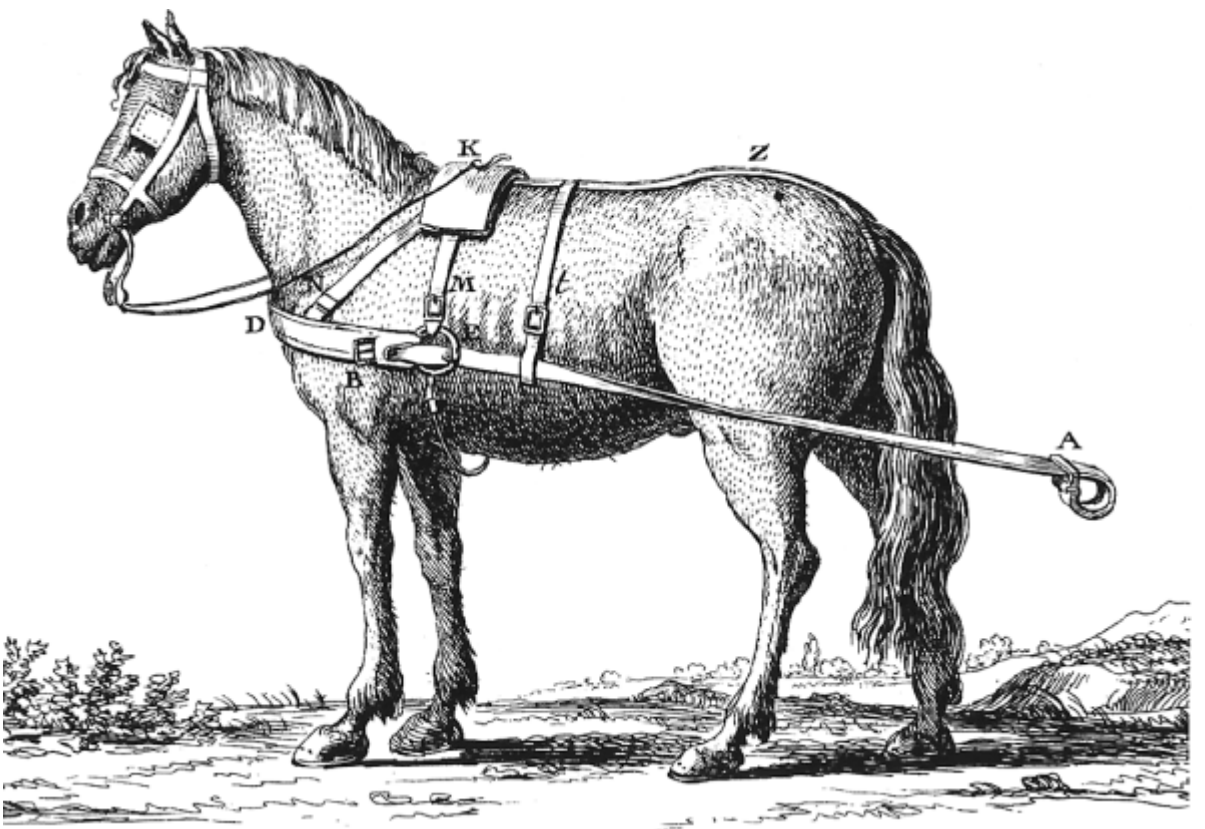
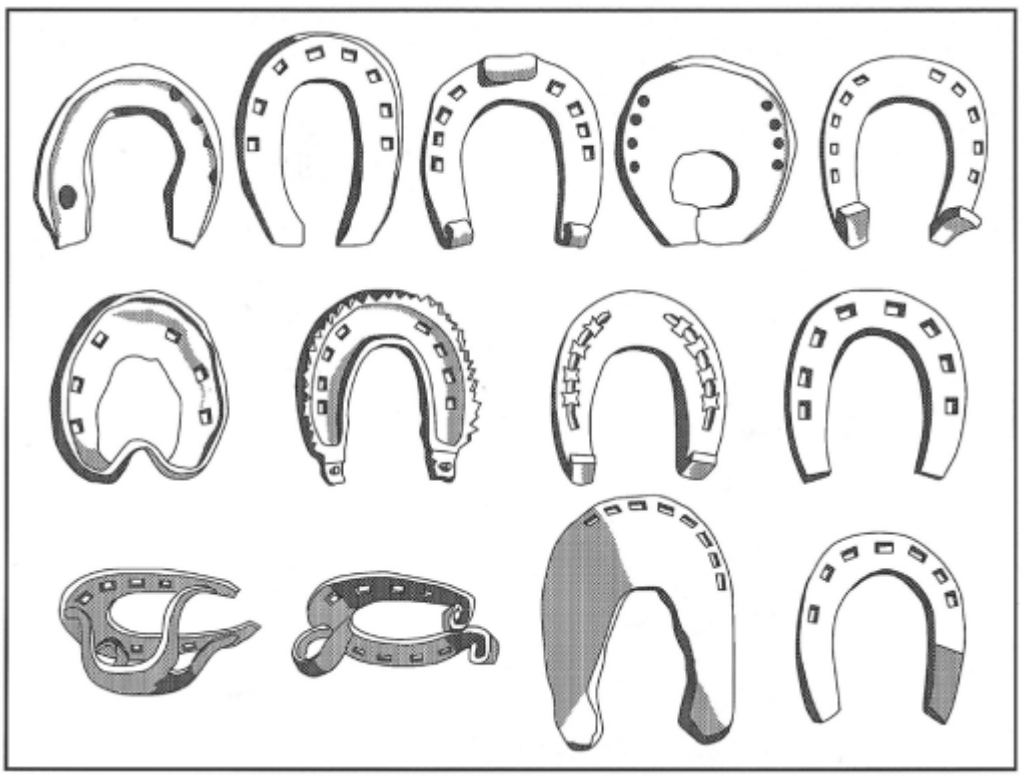


Figura 3.5 El arnés de collera siguió usándose para tareas ligeras hasta el siglo XX. Fuente: *Enciclopedia* (Diderot y D'Alembert, 1769-1772).

Los yugos de una sola cabeza, unidos a tirantes, interconectados y luego sujetos a implementos de campo, igualaban la tensión resultante de un tirón desigual. Facilitaron la conducción de los animales y permitieron enganchar un número par o impar de caballos. Los caballos también son más resistentes (trabajan 8-10 h/día, en comparación con las 4-6 h del ganado vacuno) y viven más tiempo, y, aunque tanto los bueyes como los caballos comenzaban a trabajar a

los 3-4 años de edad, generalmente los bueyes solo duraban 8-10 años, mientras que los caballos podían trabajar durante 15 e incluso 20 años. Además, la anatomía de la pierna del caballo le da una ventaja única al eliminar casi todo el coste de energía de estar de pie. El caballo tiene un ligamento suspensorio muy poderoso en la parte posterior del hueso de cañón y un par de tendones (flexores digitales superficiales y profundos) que pueden «bloquear» la extremidad sin comprometer los músculos. Esto les permite descansar (e incluso quedarse dormidos) de pie sin apenas ningún coste metabólico y gastar poca energía mientras pastan (Smythe, 1967). Los demás mamíferos necesitamos un 10% más de energía cuando estamos de pie que cuando estamos acostados.



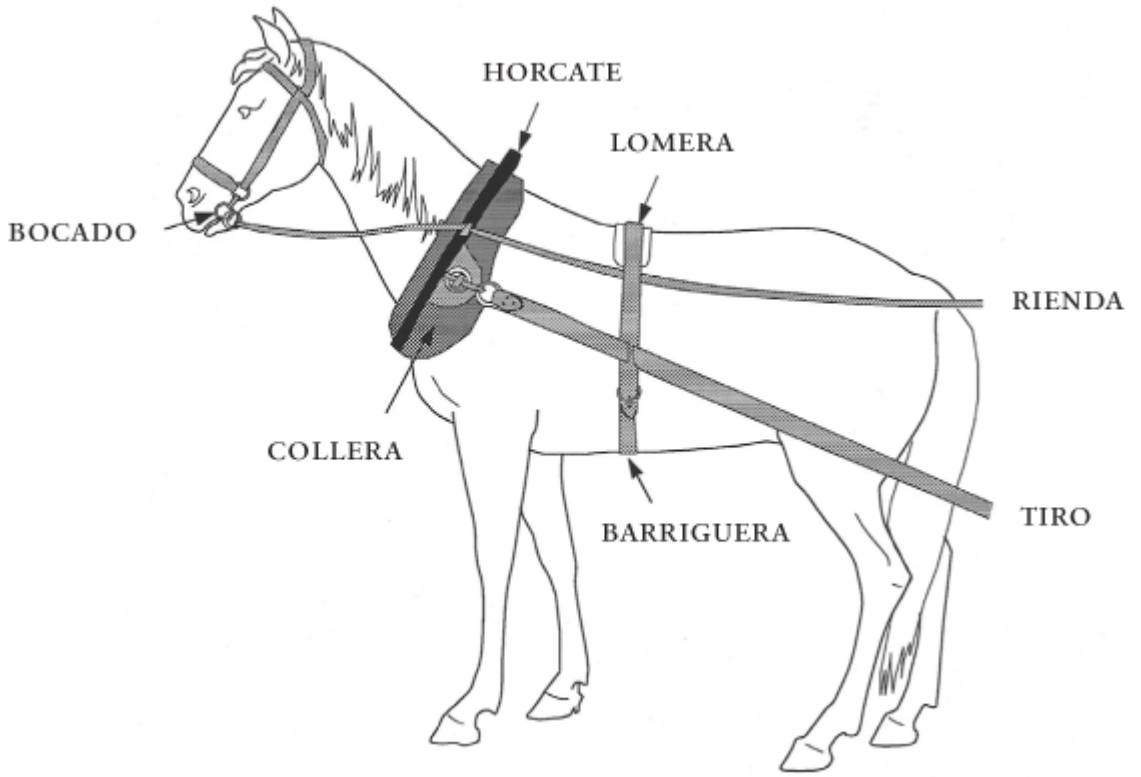


Figura 3.6 Componentes de un arnés de collera típico de fines del siglo XIX (Villiers, 1976, y Telleen, 1977) y una variedad de herraduras de mediados del siglo XVIII (Diderot y D'Alembert, 1769-1772). Se trata, respectivamente (comenzando por la izquierda), de herraduras típicas inglesas, españolas, alemanas, turcas y francesas.

Incluso animales más pequeños y mal enganchados supusieron una gran diferencia (Esmay y Hall, 1968; Rogin, 1931; Slicher van Bath, 1963). Un campesino equipado con una azada necesitaba al menos cien horas —y en suelos pesados hasta 200— para preparar una hectárea de tierra para plantar cereales. Un arado rudimentario de madera tirado por bueyes podía terminar esa tarea en algo más de treinta horas. La agricultura basada en la azada no podría haber alcanzado nunca la escala de cultivo posible con un arado tirado por animales. Además de acelerar el arado y la cosecha, el trabajo con animales también permitió sacar grandes volúmenes de agua de riego de pozos más profundos. Los animales se utilizaban para operar máquinas de procesamiento de alimentos como molinos, amoladoras y prensas a velocidades que superaban con creces la capacidad humana.

El alivio de largas horas de trabajo agotador no fue menos importante que el aumento de la productividad, aunque trabajar con animales también requirió cultivar más tierra para el forraje. Así ocurrió en América del Norte y algunas regiones de Europa, donde el mantenimiento de los caballos podía representar hasta un tercio del área agrícola.

No es sorprendente que en China y otras regiones asiáticas densamente pobladas el ganado vacuno fuera el animal de tiro preferido. Los rumiantes podían sobrevivir con hierba y paja y cuando trabajaban tampoco necesitaban mucho grano, porque los residuos del procesamiento de cultivos —como el salvado y las tortas de prensa— podían utilizarse como alimento concentrado. Según mis cálculos, en China la agricultura tradicional solo dedicaba un 5% del área de cultivo anual al pienso para animales. En la India el porcentaje era muy parecido; la mayor parte del pienso se destinaba a alimentar animales de ordeño y en menor medida vacas sagradas (Harris, 1966; Heston, 1971). Es probable que el alimento para bueyes de tiro requiriera menos del 3% de toda el área de cultivo. En las regiones más densamente pobladas del subcontinente indio el ganado sobrevivía pastando en los bordes de carretera y canales y consumiendo subproductos de cultivo, como tortas de prensa u hojas de plátano picadas (Odend'hal, 1972).

Los animales de tiro en la India o China representaban excelentes operaciones energéticas. La mayoría ni siquiera se alimentaba de la cosecha y, sin embargo, trabajaba el equivalente a 3-5 campesinos activos 300 días/año. Un caballo europeo o americano del siglo XIX no tenía un rendimiento relativo tan alto, pero también era una bendición energética (recuadro 3.6). Su mano de obra útil anual equivalía a seis agricultores y la tierra utilizada para alimentarlos (incluyendo los caballos que no trabajaban) producía alimentos para unas seis personas. Incluso considerándolo como mero sustituto del trabajo humano, el caballo de tiro del siglo XIX se habría ganado su sustento,

pero los caballos fuertes y bien alimentados podían realizar tareas más allá de la capacidad y resistencia humanas.

RECUADRO 3.6

Coste energético, eficiencia y rendimiento de un caballo de tiro

Un caballo adulto de 500 kg necesita alrededor de 70 MJ/día de energía digerible para mantener su peso (Subcommittee on Horse Nutrition, 1978). Si come mucho grano, esto significa un consumo de energía bruta de 80 MJ; si se alimenta principalmente a base de heno (menos digerible), puede necesitar hasta 100 MJ. Durante los periodos de trabajo este requisito se multiplicaba por 1,5-1,9 (en función de la tarea). Brody (1945) encontró un percherón de 500 kg que trabajaba a una potencia de 500 W y consumía 10 MJ/h. Si asumimos una jornada de trabajo de 6 horas y 18 horas de descanso (a 3,75 MJ/h), obtenemos unos 125 MJ/día.

No es sorprendente que las recomendaciones nutricionales tradicionales coincidan: a principios del siglo XX se aconsejaba a los agricultores estadounidenses alimentar a sus caballos de tiro con 4,5 kg de avena y 4,5 kg de heno al día (Bailey, 1908), esto es, unos 120 MJ/día. Suponiendo una potencia media de 500 W, un caballo generaría 11 MJ de trabajo útil en 6 horas. Y aunque un hombre medio podría generar unos 2 MJ, no podría mantener un esfuerzo constante por encima de 80 W y solo superaría los 150 W de manera esporádica, mientras que un caballo puede trabajar a una potencia constante de 500 W y alcanzar máximos de más de 1 kW, esfuerzo que requeriría el trabajo de una docena de personas.

Los caballos podían arrastrar troncos y arrancar tocones cuando los humanos convertían bosques en tierras de cultivo, romper los suelos de las praderas mediante el arado profundo o tirar de la maquinaria pesada. Como es lógico, el coste energético del trabajo animal iba más allá de la alimentación de los propios animales y el mantenimiento de las crías. Los principales «extras» eran la fabricación de arneses y herraduras y la construcción de establos. Pero el trabajo animal también traía consigo beneficios adicionales

derivados del reciclaje del estiércol, la leche, la carne y el cuero. El reciclaje del estiércol era una importante fuente de nutrientes y materia orgánica en todas las granjas tradicionales intensivas. En sociedades mayoritariamente vegetarianas, la leche y la carne (incluida la de caballo en la Europa continental) eran valiosas fuentes de proteína completa. El cuero se usaba para fabricar muchas herramientas agrícolas esenciales y en los talleres tradicionales. Y, por supuesto, los animales se reproducían.

Riego

La demanda de agua de los cultivos depende de muchas variables ambientales, agronómicas y genéticas, pero la demanda estacional total suele ser de unas mil veces la masa del grano cosechado. Se necesitan hasta 1.500 toneladas de agua para cultivar una tonelada de trigo, al menos 900 para una de arroz y unas 600 para una de maíz, el cereal básico más eficiente en el consumo de agua (Doorenbos *et al*., 1979; Bos, 2009). Esto significa que, para un rendimiento de 1-2 t/ha, el consumo total de agua durante los cuatro meses de la temporada de crecimiento del trigo fue de 15-30 cm. Sin embargo, los niveles de precipitaciones en las regiones áridas y semiáridas de Oriente Medio eran de entre virtualmente 0 y no más de 25 cm.

Por consiguiente, el cultivo en este tipo de regiones requirió riego en cuanto se crearon campos fuera del alcance de las inundaciones estacionales —que saturaban los suelos y permitían la maduración de la cosecha—, y el crecimiento de la población hizo necesaria la plantación de un segundo cultivo durante la temporada de bajamar. El riego también era necesario para hacer frente a la escasez de agua estacional, especialmente pronunciada en los confines más septentrionales del Asia monzónica, la región de Punyab y la llanura del norte de China. Y, por supuesto, el cultivo de arroz requería sus propios arreglos para inundar y drenar los campos.

El riego por gravedad —mediante canales, estanques, tanques o presas— no requiere levantar agua y, por tanto, es el sistema con el

menor coste de energía. Pero en los valles de ríos con gradientes de corriente mínimos y en grandes llanuras cultivadas siempre ha sido necesario elevar grandes volúmenes de agua superficial o subterránea. Muchos elevadores solo atravesaban un pequeño terraplén, pero otros tenían que atravesar potentes bancos de corrientes o servían para sacar agua de pozos profundos. Algunas ineficiencias inevitables (agravadas por el acabado tosco de las piezas móviles y la ausencia de lubricantes) dificultaban la tarea. El riego manual (impulsado por músculos humanos) representaba una importante carga laboral, incluso en sociedades perfectamente acostumbradas al trabajo duro. Por eso se dedicó mucho ingenio a diseñar dispositivos mecánicos que utilizaran la energía animal o el flujo de agua para aligerar el trabajo y posibilitar elevaciones más importantes.

Se inventó una impresionante variedad de dispositivos mecánicos para elevar el agua de riego (Ewbank, 1870; Molenaar, 1956; Oleson, 1984, 2008; Mays, 2010). Los más simples —cubos y cestas tejidos o forrados y con forma de pala— elevaban el agua a menos de 1 m del suelo. Más adelante se utilizaron cestas y cubos suspendidos por una cuerda enganchada a un trípode que fueron un poco más eficaces. Ambos dispositivos se usaron en Asia oriental y Oriente Medio. Con todo, el método de levantamiento de agua que más pronto se generalizó fue el contrapeso o cigoñal, comúnmente conocido como *shaduf* árabe. Hallado por primera vez en un sello cilíndrico babilónico de 2000 a. C. y ampliamente utilizado en el antiguo Egipto, llegó a China alrededor de 500 a. C. y finalmente se extendió por todo el Viejo Mundo. Los *shaduf* —básicamente un poste de madera largo apoyado encima de un soporte y utilizado como palanca — se fabricaban y reparaban fácilmente (figura 3.7).

El recipiente se colocaba en el extremo del brazo más largo del *shaduf* y se contrapesaba con una piedra grande o una bola de barro seco. Su elevación efectiva era de 1-3 m, aunque en Oriente Medio era común desplegar series de dos y hasta cuatro niveles sucesivos. Un hombre solo podía elevar unos 3 m^3/h a una altura de 2-2,5 metros.

Tirar de una cuerda podía resultar muy cansado, pero girar un tornillo de Arquímedes para rotar una hélice de madera dentro de un cilindro lo era todavía más y solo permitía elevaciones bajas (25-50 cm). Las ruedas de paletas se usaban habitualmente en Asia. Las «escaleras de agua» chinas (*long gu che*) funcionaban como una cadena de bombas de madera de paleta cuadrada, con una serie de pequeñas tablas que pasaban sobre ruedas dentadas y formaban una cadena sin fin para elevar el agua a través de un canal de madera (figura 3.8). La rueda dentada se introducía en un poste horizontal que pisaban dos o más hombres sosteniéndose en un poste vertical. Algunas escaleras utilizaban manivelas o animales que caminaban en círculo.

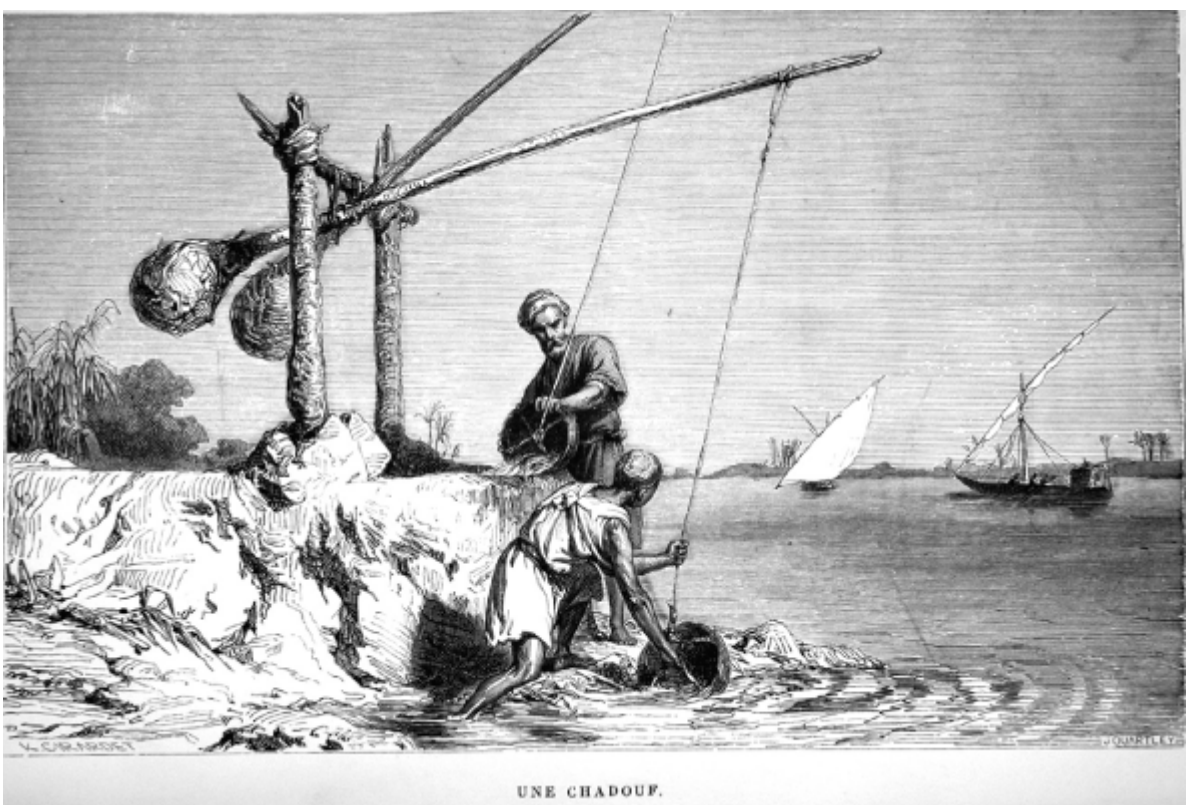


Figura 3.7 Grabado del siglo XIX de campesinos egipcios usando un *shaduf* (Corbis).

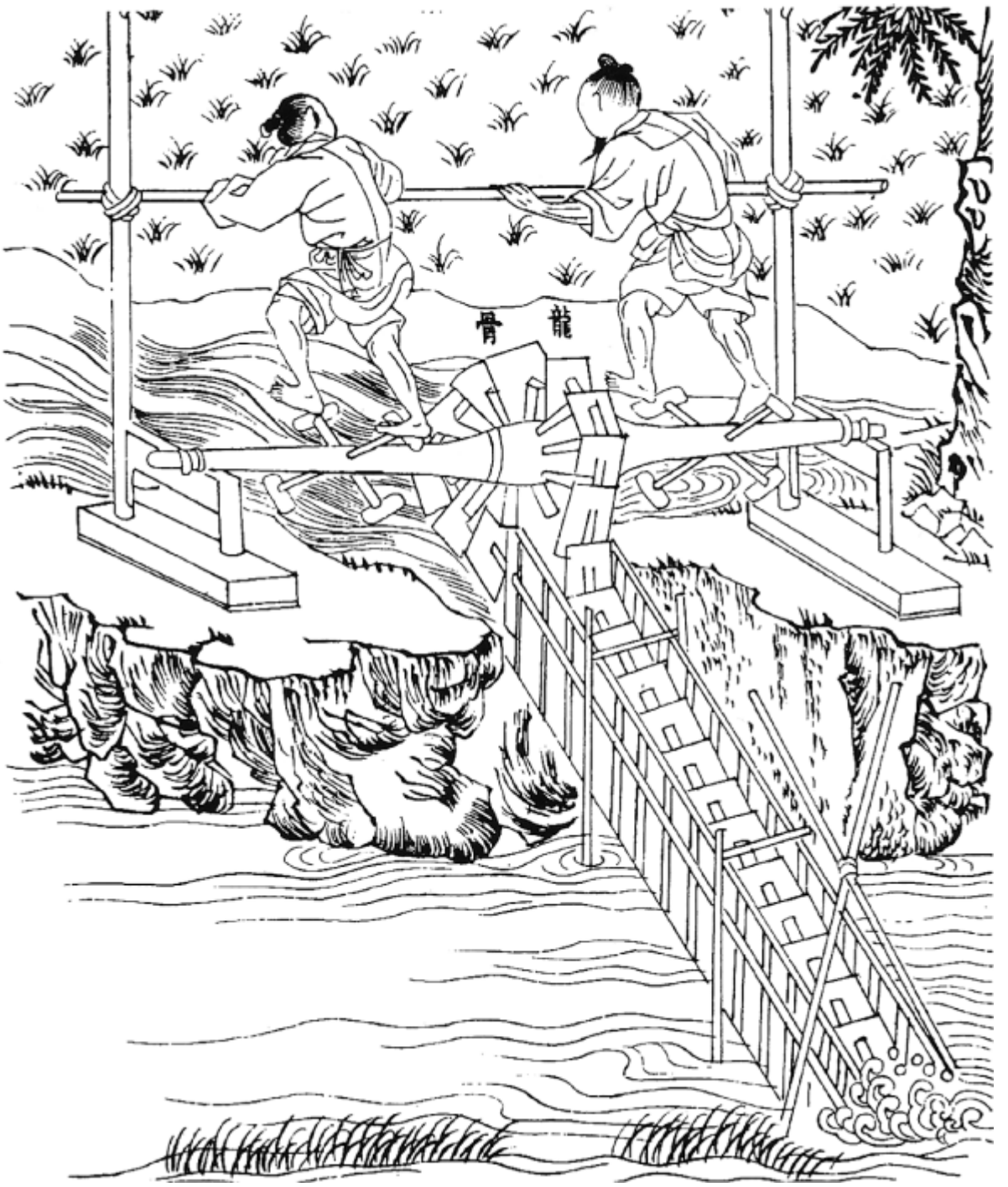


Figura 3.8 Las antiguas «escaleras de agua» chinas estaban impulsadas por campesinos que, apoyados en un poste, pisaban un eje radiado. Adaptado de una ilustración de la dinastía Ming tardía.

Todos los dispositivos enumerados a continuación utilizaron siempre el trabajo animal o la inercia del agua corriente. El elevador

de cubo y cuerda, común en India (*monte* o *charsa*), utilizaba uno o dos pares de bueyes que bajaban por una pendiente mientras levantaban una bolsa de cuero sujeta a una cuerda larga. Los griegos usaban una cadena interminable de ollas de barro en dos bucles de cuerda que se colocaban boca abajo debajo de un tambor de madera para llenar en el extremo inferior y descargar en un canal en la parte superior. Este dispositivo, más conocido por su nombre árabe, *saqiya*, se extendió por todo el Mediterráneo. Impulsado por un animal con los ojos vendados y que camina en círculo, solía servir para levantar agua de pozos de menos de 10 m de profundidad a una velocidad no superior a 8 m^3/h. Una versión egipcia mejorada, conocida como *zawafa*, podía desplazar agua a una velocidad de hasta 12 m^3/h de un pozo de 6 m de profundidad.

La noria de agua, otro dispositivo muy utilizado tanto en países musulmanes como en China (*hung che*), consistía en una serie de ollas de barro, tubos de bambú o cubos de metal sujetos al borde de una sola rueda (o noria). Las norias se ponían en movimiento a través de engranajes en ángulo recto activados por animales caminando en círculo o por corrientes de agua (si estaban equipadas con paletas). La necesidad de levantar los cubos por encima del nivel del canal receptor era una fuente de ineficiencia considerable que fue eliminada por la *tabliya* egipcia. Este dispositivo mejorado, impulsado por bueyes, incluía una rueda de metal de doble cara que recogía agua en el borde exterior y la descargaba en el centro en un canal lateral. La comparación de los requisitos de potencia habituales, las elevaciones y la producción horaria de los dispositivos tradicionales de elevación de agua ponen en evidencia los límites del rendimiento humano (recuadro 3.7, figura 3.9).

El coste energético del riego manual era extraordinariamente alto. Un campesino podía cortar 1 ha de trigo con una guadaña en 8 h, pero hubiera necesitado tres meses (8 h/día) para levantar la mitad de su requerimiento de agua desde un canal o arroyo adyacente 1 m más bajo. No pueden hacerse generalizaciones con respecto al retorno

energético del riego tradicional porque cada cultivo responde al riego de manera muy distinta. No solo hay diferencias sustanciales entre cultivos, sino que la reacción de la cosecha también depende del ritmo de la disponibilidad de agua (los cacahuetes son prácticamente insensibles a un déficit temporal de agua, mientras que el maíz es muy vulnerable). En cualquier caso, un ejemplo realista muestra que el retorno energético podía ser fácilmente de 10 o más (recuadro 3.8).

En contraste, el retorno energético neto de algunos proyectos incas debió de ser bajo. La irrigación por gravedad no requería elevar el agua, pero cavar canales largos y anchos (de hasta 10-20 m de ancho) a partir de rocas y utilizando herramientas sencillas tuvo que exigir muchísimo trabajo. El principal canal arterial entre Parcoy y Picuy recorría 700 km para irrigar pastos y campos (Murra, 1980). Los conquistadores españoles se asombraron al ver canales bien construidos que transportaban agua a un pequeño grupo de campos de maíz. Los grandes proyectos de riego requirieron una planificación y ejecución muy cuidadosas (para mantener los gradientes apropiados) y movilizaron a muchísimos trabajadores. Por supuesto, la recompensa —una producción de energía alimentaria de cultivos de regadío superior a la enorme inversión de mano de obra— se pospuso durante años e incluso décadas. Los únicos poderes capaces de emprender tales programas de construcción pública debieron de ser gobiernos centrales bien establecidos y capaces de trasladar recursos entre diferentes regiones del territorio. Generalmente la gestión del agua para la mejora del rendimiento de los cultivos ha implicado regar el campo; sin embargo, algunas agriculturas intensificaron su cultivo mediante un proceso opuesto.

RECUADRO 3.7

Requisitos de potencia, elevaciones y capacidades de los dispositivos tradicionales de elevación de agua

Dispositivos	Personas/ animales	Elevación (m)	Capacidad (m^3/h)	Trabajo (kJ)	Input (kJ)	Eficiencia (%)
Cubos	2/—	0,6	5	30	440	7
Cubos suspendidos	2/—	1	8	80	440	18
Shaduf	1/—	2,5	3	75	220	34
Tornillo de Arquímedes	2/—	0,7	15	100	440	23
Rueda de paletas	1/—	0,5	12	60	220	27
Escalera de agua	2/—	0,7	9	60	440	14
Elevador de cubo y cuerda	3/4	9	17	1.500	5.690	26
Saqiya	1/2	6	8	470	2.740	17
Zawafa	1/2	6	12	710	2.740	26
Noria de agua grande	1/2	9	9	790	2.740	29
Noria de agua pequeña	1/1	1,5	22	325	1.480	22
Tabliya	1/1	2,5	12	295	1.480	20

Nota: el cálculo del coste de energía supone una potencia media de 60 W para las personas y 350 W para los animales de tiro.

Fuentes: compilado y calculado a partir de datos en Molenaar (1956), Forbes (1965), Needham *et al.* (1965) y Mays (2010).

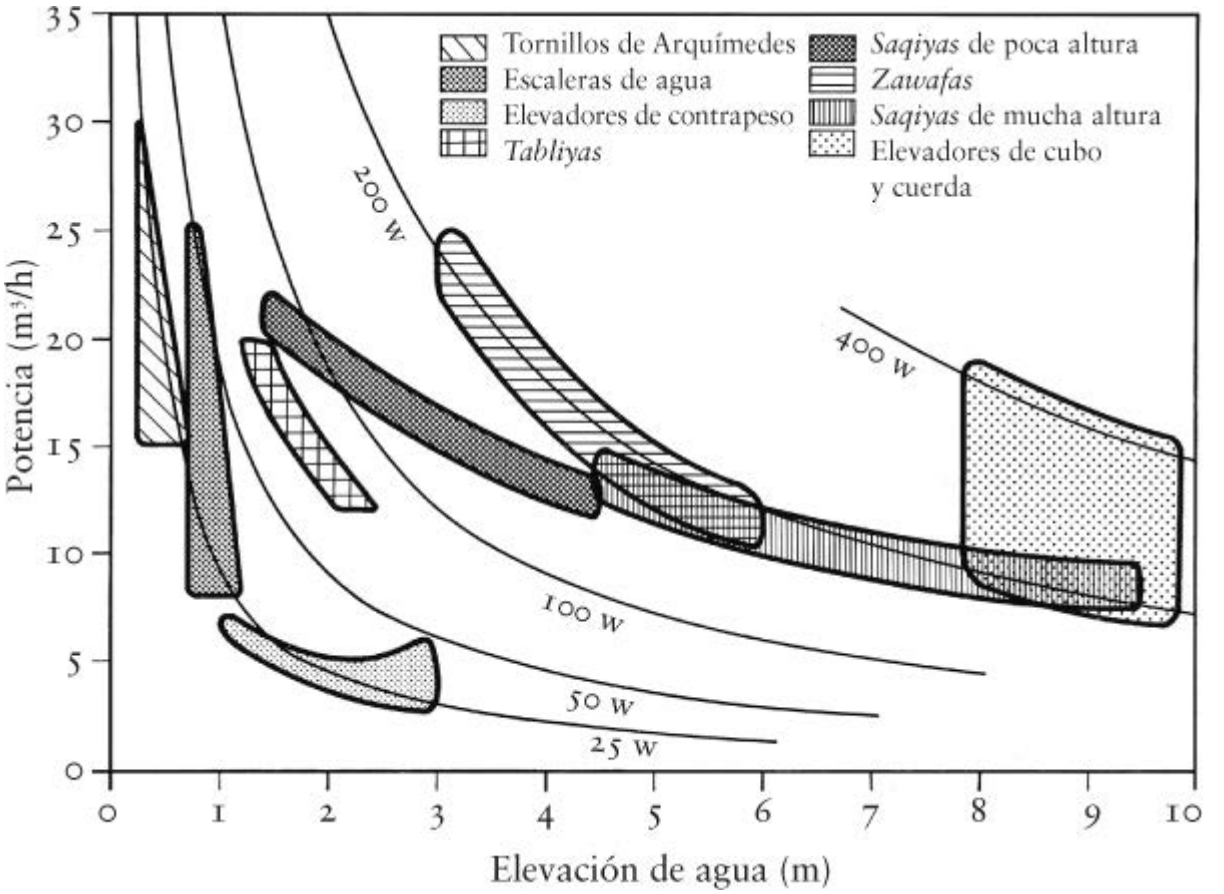


Figura 3.9 Comparación de elevaciones, volúmenes y requisitos de potencia de dispositivos y máquinas preindustriales de elevación de agua. Creado con datos de Molenaar (1956), Forbes (1965) y Needham *et al.* (1965).

RECUADRO 3.8

Retorno de energía del riego

El considerable retorno energético del riego tradicional queda patente mediante un simple cálculo. Sabemos que un déficit del 20% en el suministro anual de agua durante el periodo crítico de floración del trigo de invierno reduce el rendimiento del cultivo a la mitad (Doorenbos *et al.*, 1979). En un campo familiar típico de 0,2 ha, una buena cosecha del periodo tardío de la dinastía Qing (1,5 t/ha) generaría 150 kg menos. Compensar un déficit de 10 cm de lluvia gracias al riego requeriría 200 t de agua, pero como la eficiencia del riego por surcos era del 50% (debido a la filtración y evaporación del suelo), el suministro real de un canal tendría que haber sido el doble de grande. Elevar 400 t de agua algo menos de 1 m utilizando una escalera de

agua operada por dos campesinos requeriría 80 h de trabajo y 65 MJ de energía alimentaria adicional, mientras que por su parte el rendimiento del trigo supondría —después de restar un 10% de cuidado de las semillas y pérdidas de almacenamiento— 2 MJ de energía digerible. En consecuencia, el retorno energético de la escalera de agua sería de más o menos 30.

En muchas regiones la agricultura continua hubiera sido impensable sin el drenaje del exceso de agua. El emperador Yu (2205-2198 a. C.), uno de los siete grandes sabios preconfucianos, debe su lugar en la historia china a su plan maestro y el enorme esfuerzo que hizo para drenar las aguas de las inundaciones (Wu, 1982). Y los mayas y los sucesivos habitantes de la cuenca de México adoptaron formas más intensivas de cultivo que requerían un manejo del agua que abarcaba desde el simple aterrazamiento y riego por aspersión hasta la adopción de complejos sistemas de drenaje y la construcción extensiva de terrenos elevados (Sanders, Parsons y Santley, 1979; Flannery, 1982; Mays y Gorokhovich, 2010). Un tipo muy particular de agricultura de drenaje evolucionó durante muchos siglos en una parte de la provincia china de Guangdong (Ruddle y Zhong, 1988). Los diques de cultivo intensivo separaban estanques abastecidos con varias especies de carpas. El reciclaje de desechos orgánicos —excrementos de humanos, cerdos y gusanos de seda, residuos de cultivo, pasto, maleza y depósitos de estanques— mantenía altos rendimientos de moreras para gusanos de seda, caña de azúcar, arroz y numerosas verduras y frutas, así como una elevada producción de pescado.

Fertilización

El CO_2 atmosférico y el agua suministran carbono e hidrógeno que, transformados en carbohidratos, constituyen los dos principales elementos de los tejidos vegetales. Pero hay otros elementos que son indispensables para la fotosíntesis. Dependiendo de la cantidad necesaria, se clasifican como macronutrientes o micronutrientes. Estos

últimos son más numerosos, incluyendo sobre todo hierro, cobre, azufre, sílice y calcio. Solo hay tres macronutrientes: nitrógeno, fósforo y potasio (N, P y K). El nitrógeno es, con mucho, el más importante: está presente en todas las enzimas y proteínas y es el elemento que escasea con mayor frecuencia en suelos cultivados de manera continua (Smil, 2001; Barker y Pilbeam, 2007). La cosecha de 1 t/ha de trigo (típica de Francia o Estados Unidos en 1800) elimina (en grano y paja) cerca de 1 kg de calcio y magnesio (Ca y Mg), 2,5 kg de azufre (S), 4 kg de potasio, 4,5 kg de fósforo y 20 kg de nitrógeno (Laloux *et al*., 1980).

En muchos casos la lluvia, el polvo, la intemperie y el reciclaje de residuos de cultivo reponen la extracción de fósforo, potasio y micronutrientes, pero el cultivo continuo sin fertilización genera un déficit de nitrógeno que, como el tamaño del grano y el contenido en proteínas vienen determinados por la disponibilidad de nitrógeno, en el pasado causó retraso en el crecimiento, un rendimiento bajo y mala calidad nutricional. La agricultura tradicional solo reemplazó el nitrógeno de tres maneras: reciclando directamente residuos de cultivos no deseados —es decir, arando una parte de la paja y los tallos que no eran retirados de los campos para alimentación, combustible y otros usos domésticos—; aplicando distintos tipos de materia orgánica, sobre todo esparciendo orina y heces humanas y animales y otros desechos orgánicos (generalmente compostados); y mediante el cultivo de leguminosas, que aumentaban el contenido de nitrógeno del suelo para cultivos posteriores (Smil, 2001; Berklian, 2008).

La paja de los cereales era una fuente importante de nitrógeno, pero su reciclaje directo era limitado. A diferencia de las plantas modernas de tallos cortos, las variedades tradicionales cultivadas producían mucha más paja que grano, con relaciones habituales de 2:1. Arar tanta masa vegetal podía haber generado mucha tensión para muchos animales, pero en la práctica casi nunca se dio tal situación. Solo una pequeña parte de los residuos de la cosecha volvía

directamente al suelo porque se utilizaban como alimento y lecho para animales (después se reciclaban como estiércol), combustible doméstico y materia prima para la construcción y la fabricación. En regiones boscosas, la paja y los tallos solían quemarse en el campo, con una pérdida de nitrógeno casi total.

El reciclaje de orina y excrementos fue perfeccionándose durante siglos tanto en Europa como en Asia oriental. En las ciudades chinas se reciclaban grandes cantidades de desechos humanos (70-80%). Del mismo modo, en la década de 1650 se reciclaron casi todos los desechos humanos producidos en Edo, la actual Tokio (Tanaka, 1998). La utilidad de esta práctica estaba limitada por la disponibilidad de dichos desechos y su bajo contenido de nutrientes, así como por la cantidad de trabajo repetitivo y pesado que implicaba. Incluso antes de las pérdidas de almacenamiento y manipulación, el rendimiento anual de los desechos humanos solo daba 3,3 kg de nitrógeno de media por persona (Smil, 1983). La recogida, el almacenamiento y la entrega de estos desechos de las ciudades al campo circundante crearon malolientes industrias a gran escala, que incluso en Europa sobrevivieron durante la mayor parte del siglo XIX, hasta que se completó la construcción de canalizaciones. Barles (2007) estimó que en 1869 París generaba anualmente 4,2 Mt de nitrógeno provenientes en un 40% de estiércol de caballo y un 25% de desechos humanos. A finales del siglo XIX, la mitad de los excrementos de la ciudad se recogían y procesaban industrialmente para producir sulfato de amonio (Barles y Lestel, 2007).

El reciclaje de desechos animales mucho más copiosos —que implicaba la limpieza de establos, la fermentación líquida o el compostaje de desechos mezclados previa aplicación agrícola y la transferencia de los desechos al campo— consumía aún más tiempo. Y como la mayoría de los estiércoles solo contienen alrededor de un 0,5% de nitrógeno, y como además las pérdidas de preaplicación y campo de este nutriente eran habitualmente de hasta el 60% del contenido inicial, se requerían cantidades gigantescas de desechos

orgánicos para producir un mayor rendimiento. En el siglo XVIII, los campos de Flandes recibieron una media de 10 t/ha —y algunos hasta 40 t/ha— de estiércol, excrementos, tortas de prensa y ceniza. En la Francia prerrevolucionaria la tasa típica fue de 20 t/ha (Slicher van Bath, 1963; Chorley, 1981). Del mismo modo, informes muy detallados de la década de 1920 en China muestran un promedio nacional superior a 10 t/ha y una tasa de casi 30 t/ha en las pequeñas granjas del suroeste del país (Buck, 1937).

En la agricultura tradicional se utilizaron todos los desechos orgánicos imaginables como fertilizante. El ya citado tratado *De agri cultura*, de Catón, enumera el estiércol de palomas, cabras, ovejas, vacas y «el de todos los demás animales», así como abonos hechos a partir de paja, altramuces, cizaña, tallos de judías, cáscaras y hojas de encina y roble. Además, los romanos sabían que la rotación de los cultivos de granos con leguminosas (consumían altramuces, judías y arvejas) aumentaría los rendimientos. En Asia, el uso de los desechos orgánicos era aún más ecléctico y comprendía desde desechos relativamente ricos en nitrógeno (como tortas de prensa y desechos de pescado) hasta lodo de canales y ríos con un simple rastro del nutriente. A medida que las ciudades crecieron, los desechos de alimentos —sobre todo los restos vegetales— crearon una nueva fuente de materia reciclable.

El fertilizante orgánico con el mayor contenido de nitrógeno (un 15% en los mejores depósitos) es el guano, excremento de aves marinas preservado por el clima seco de las islas que hay a lo largo de la costa peruana. Los conquistadores españoles quedaron impresionados con el uso que los incas hacían de él (Murra, 1980). En 1824 comenzó a exportarse guano a Estados Unidos y en 1840 a Inglaterra; durante la década de 1850 la exportación creció muchísimo; en 1872 ya se habían exportado los mejores depósitos, provenientes de las islas Chincha, en Perú (Smil, 2001). Más tarde los nitratos chilenos se convirtieron en la fuente de nitrógeno comercializado más importante del mundo, a medida que los países

industrializados comenzaron a dopar sus cosechas con aportes de combustible, metales, máquinas y fertilizantes inorgánicos, proceso descrito en detalle en el capítulo 5.

Las aplicaciones de campo reales variaron mucho en función de la proporción de estiércol recuperable (muy elevada en animales encerrados; insignificante en animales de pastoreo), la actitud hacia la gestión de los desechos humanos (desde la prohibición hasta el reciclaje rutinario) y la intensidad del cultivo. Cualquier estimación teórica de la presencia de nitrógeno en desechos reciclados estará muy lejos de su contribución real. Esto se debe a las elevadas pérdidas (principalmente mediante volatilización del amoníaco y lixiviación en aguas subterráneas) que generaban el vaciado, la recolección, el compostaje, la aplicación y la eventual absorción de nitrógeno por los cultivos (Smil, 2001). Estas pérdidas —habitualmente de más de dos tercios del nitrógeno inicial— aumentaron aún más la necesidad de aplicar enormes cantidades de desechos orgánicos. En consecuencia, en todas las granjas tradicionales intensivas una parte importante del trabajo humano se dedicaba a pesadas y poco agradables tareas de recogida, fermentación, transporte y aplicación de desechos orgánicos.

El abono verde se utilizó en Europa desde la antigua Grecia y la era romana. También fue muy frecuente en el este de Asia. La práctica se basaba principalmente en cultivos leguminosos fijadores de nitrógeno, inicialmente arvejas (*Astragalus*, *Vicia*) y tréboles (*Trifolium*, *Melilotus*) y más tarde también alfalfa (*Medicago sativa*). Estas plantas pueden fijar hasta 100-300 kg de N/ha por año y, cuando se rotan con otros cultivos (generalmente utilizados como cultivos de invierno en climas más templados), en los 3-4 meses previos al arado agregan 30-60 kg de nitrógeno al suelo, que posteriormente puede ser aprovechado por un cultivo de cereales u oleaginosas y aumentar así su rendimiaento.

Las densidades de población elevadas favorecen la siembra de otro cultivo alimentario durante los meses de invierno. Esta práctica reduce inevitablemente la disponibilidad total de nitrógeno y afecta al

rendimiento. A corto plazo resulta energéticamente ventajosa, porque produce carbohidratos y aceites adicionales. Pero a largo plazo el suministro de nitrógeno en cantidad suficiente resulta tan importante que los agricultores intensivos no pueden hacer otra cosa que plantar leguminosas fijadoras de nitrógeno en lugar de variedades comestibles. Esta práctica (anual o parte de una secuencia más larga de rotación de cultivos) quizá sea la optimización energética más admirable de la agricultura tradicional. No es sorprendente que fuera la base de todos los sistemas agrícolas intensivos que dependían de rotaciones de cultivo complejas. Con todo, hubo que esperar al periodo 1750-1880 para que las rotaciones estándar, incluidos los cultivos de cobertura de leguminosas (ejemplificados por la sucesión cuatrienal de trigo, nabos, cebada y trébol de Norfolk), fueran ampliamente adoptadas en Europa, triplicando la tasa de fijación simbiótica de nitrógeno y asegurando un rendimiento creciente de cultivos no leguminosos (Campbell y Overton, 1993).

Chorley (1981: 92) entendió que este cambio marcó una época y utilizó la etiqueta de «revolución agrícola»:

> Aunque el avance fuera generalizado y resultara de multitud de pequeños cambios, hubo un cambio fundamental cuya importancia es difícil exagerar: la generalización de los cultivos de leguminosas y el consiguiente aumento del suministro de nitrógeno. ¿No es fantástico sugerir que esta innovación —de la que prácticamente no se habla— tuvo una importancia comparable a la de la máquina de vapor en el desarrollo económico europeo durante la industrialización?

Wrigley (2002) ilustró los logros resultantes en la agricultura inglesa al comparar su desempeño en 1300 y 1800, y Muldrew (2011) documentó cómo los cambios posteriores a 1650 condujeron a una dieta cada vez más variada y nutritiva y cómo estas mejoras en la dieta

de los trabajadores promovieron una mayor productividad, empleo estable y una riqueza creciente.

Diversidad de cultivos

La agricultura moderna está dominada por monocultivos (plantaciones anuales del mismo cultivo) que reflejan la especialización regional de la agricultura comercial.

Pero la siembra reiterada de una misma especie tiene un elevado coste energético y ambiental. Exige utilizar fertilizantes para reemplazar los nutrientes eliminados y productos químicos para controlar las plagas que prosperan en grandes plantaciones uniformes. El monocultivo en hilera, como el del maíz, donde buena parte del suelo permanece expuesto a la lluvia durante mucho tiempo (hasta que las plantas crecen lo suficiente para protegerlo), causa una enorme erosión en terrenos inclinados. Y el cultivo constante de arroz en suelos inundados y privados de oxígeno degrada la calidad de los suelos.

Siglos de experiencia advirtieron a muchos agricultores antiguos de los peligros del monocultivo. La rotación de cereales y leguminosas repone el nitrógeno del suelo o como mínimo facilita el drenaje de las reservas del suelo. La siembra de diferentes cultivos de grano, tubérculos, oleaginosas y plantas fibrosas reduce el riesgo de pérdida total de la cosecha, dificulta el establecimiento de plagas persistentes, acota la erosión y mantiene mejores propiedades del suelo (Lowrance *et al*., 1984; USDA, 2014). Las plantas utilizadas en la rotación de cultivos pueden elegirse en función de las condiciones climáticas y el suelo y para satisfacer preferencias dietéticas específicas. La rotación es altamente deseable desde un punto de vista agronómico, aunque es obvio que, cuando se cultiva más de una planta al año (policultura), también se requiere más mano de obra. En regiones con periodos de sequía se necesitará riego, y en cultivos múltiples intensivos (con tres e incluso cuatro especies diferentes cultivadas cada año en el mismo campo) también se necesitará una cantidad sustancial de fertilizantes.

Cuando dos o más cultivos se cultivan a la vez en el mismo campo (asociación de cultivos), la demanda laboral puede ser aún mayor. La recompensa fundamental de la policultura es que una misma cantidad de tierra cultivada puede dar de comer a una población más grande.

La diversidad tradicional de cultivos y esquemas de rotación es impresionante. Por ejemplo, el segundo estudio de Buck sobre la agricultura china contó 547 sistemas de cultivo diferentes en 168 localidades (Buck, 1937). Con todo, existen algunos puntos en común importantes. Ninguno es más trascendente que la ya señalada vinculación de granos de leguminosas y cereales. Además de su contribución a la fertilidad del suelo y al suministro de proteínas, algunas legumbres, especialmente la soja y el cacahuete, también producen aceites comestibles de calidad y que siempre fueron bienvenidos en las dietas tradicionales. Las tortas de prensa de semillas oleaginosas (el material compacto que queda después de la extracción del aceite) se convirtieron en alimentos ricos en proteínas para animales domésticos y excelentes fertilizantes orgánicos.

El segundo punto en común también ha sido analizado anteriormente: la combinación de abonos verdes y cultivos alimentarios ocupó un lugar importante en todas las formas de agricultura tradicional intensiva. Un tercer elemento en común, la rotación de cultivos, reflejaba el deseo de producir fibras, carbohidratos básicos (cereales, tubérculos) y cultivos oleaginosos. Así, por ejemplo, el cultivo chino tradicional incluía numerosos esquemas de rotación de trigo, arroz y cebada con soja, cacahuete o sésamo y algodón y yute. Además de cereales básicos (trigo, centeno, cebada, avena) y legumbres (guisantes, lentejas, frijoles), los campesinos europeos cultivaron lino y cáñamo para obtener fibra. Los cultivos mayas incluían los tres productos básicos de la agricultura del Nuevo Mundo: maíz, frijoles y calabazas, así como tubérculos (patata, yuca, jícama) y agave y algodón para obtener fibra (Atwood, 2009).

A menudo la inercia de las prácticas agrícolas tradicionales permaneció intacta incluso después de varios milenios: siembra de granos de secano a mano; trasplante de plántulas de arroz a campos inundados; aprovechamiento de bueyes de movimiento lento y guía de simples arados de madera; cosecha manual con hoces o guadañas y trilla con mayales o animales. Con todo, la aparente constancia de algunos procesos recurrentes oculta numerosas —aunque casi siempre muy graduales— mejoras e innovaciones, que fueron desde la difusión de mejores técnicas agronómicas hasta la adopción de nuevos cultivos.

La propagación de cultivos tuvo un efecto profundo al introducir nuevos carbohidratos básicos (maíz, patatas) y nuevas verduras y frutas ricas en micronutrientes. Algunos procesos de propagación fueron relativamente lentos y siguieron más de una ruta. El pepino (*Cucumis sativus*), por ejemplo, llegó a Europa por dos vías independientes, primero (antes del surgimiento del islam) por tierra desde Persia (hacia el este y norte de Europa) y después por una ruta marítima que llegaba hasta Andalucía (París, Daunay y Janick, 2012). Sin duda, la proliferación más espectacular de nuevos cultivos fue la que siguió a la conquista de las Américas, que trajo consigo el consumo mundial de patata, maíz, tomate y pimiento y el cultivo pantropical de piñas, papayas, vainilla y cacao (Foster y Cordell, 1992; Reader, 2008). Quizá la mejor manera de apreciar la evolución de la agricultura sea analizar a fondo los cuatro sistemas agrícolas tradicionales más importantes y a continuación los rápidos avances de la agricultura preindustrial norteamericana.

Históricamente, el primer sistema agrícola es el de Oriente Medio, ejemplificado por las prácticas egipcias. Allí, las limitaciones naturales (la disponibilidad limitada de tierra cultivable y una virtual ausencia de precipitaciones) y una extraordinaria generosidad natural (las inundaciones anuales del Nilo que suponen un suministro predecible de agua y nutrientes) se combinaron para ofrecer una agricultura

altamente productiva desde los primeros tiempos dinásticos. A principios del siglo XX, después de un largo periodo de estancamiento, los campesinos egipcios todavía obtenían algunos de los mejores resultados alcanzables con sistemas de agricultura tradicional (sin usar energías fósiles).

La agricultura tradicional china es ilustrativa de la admirable productividad de las cosechas de Asia oriental, que dieron de comer a las mayores poblaciones culturalmente cohesionadas del mundo y permanecieron prácticamente sin cambios hasta la década de 1950. Esta persistencia permitió estudiar los sistemas agrícolas asiáticos con métodos científicos modernos y cuantificar su productividad de manera fidedigna. Las sociedades mesoamericanas complejas dependían de un cultivo único y altamente productivo realizado sin arado ni animales de tiro. La agricultura europea evolucionó desde sencillos sistemas agrícolas en el Mediterráneo hasta sistemas mucho más avanzados durante los siglos XVIII y XIX. La transferencia de técnicas agrícolas tradicionales europeas a América del Norte, así como la tasa de innovación agrícola sin precedentes en Estados Unidos durante el siglo XIX, crearon el sistema agrícola tradicional más eficiente del mundo.

Antiguo Egipto

La agricultura predinástica egipcia, de la que hay rastros desde poco antes de 5000 a. C., coexistió con una gran cantidad de caza (de antílopes, cerdos, cocodrilos y elefantes), caza de aves (gansos y patos), pesca (especialmente fácil en aguas poco profundas inundadas) y recolección de plantas (hierbas y raíces). El farro y la cebada de dos carreras fueron los primeros cereales cultivados, mientras que la oveja (*Ovis aries*) fue el primer animal domesticado. La siembra de octubre y noviembre seguía al retroceso de las aguas del Nilo, el deshierbe de cultivos era poco frecuente y las cosechas se producían al cabo de 5-6 meses. Cálculos basados en registros arqueológicos indican que la agricultura predinástica egipcia pudo alimentar hasta 2,6 personas/ha

de tierra cultivada, aunque es probable que una media realista corresponda a la mitad de esa tasa.

La agricultura egipcia siempre ha sido próspera gracias al riego. Tanto durante el Imperio Antiguo (2705-2205 a. C.) como durante el Imperio Nuevo (1550-1070 a. C.) esto significó una manipulación de las aguas de inundación anuales relativamente sencilla, fundamentalmente mediante la construcción de diques más altos y fuertes, el bloqueo de los canales de drenaje y la subdivisión de las cuencas de inundación (Butzer, 1984; Mays, 2010). A diferencia de lo que ocurrió en Mesopotamia o el valle del Indo, en Egipto no pudo utilizarse el riego perenne mediante canales: el gradiente del Nilo es muy pequeño (1:12.000) e hizo imposible la canalización radial; su primer uso (limitado) fue en la depresión de Fayum durante la dinastía ptolemaica (después del 330 a. C.).

Del mismo modo, la ausencia de dispositivos efectivos de elevación del agua durante el periodo dinástico limitó mucho el riego de las tierras de cultivo más elevadas. Los elevadores de contrapeso, utilizados desde el periodo amarniense (siglo XIV a. C.), solo servían para regar pequeñas parcelas parecidas a jardines. La *saqiya* (noria o rueda persa en español), impulsada por animales y necesaria para elevaciones continuas y pesadas, solo se adoptó durante la dinastía ptolemaica. Consecuentemente, durante el periodo dinástico no hubo cultivos de verano, sino cultivos de invierno más extensos. El trigo y la cebada eran los cereales dominantes, la cosecha se realizaba con hoces de madera que disponían de hojas cortas y dentadas de sílex, y la paja se cortaba muy por encima del suelo (a veces justo por debajo de las cabezas). Esta práctica (habitual también en la Europa medieval) facilitaba la cosecha, el transporte hasta la era y la trilla. En el clima seco de Egipto la paja podía cortarse más tarde según fuera necesario para tejer, fabricar ladrillos o como combustible para cocinar, mientras que el rastrojo era pastado por animales domésticos.

Las pinturas de muchas tumbas egipcias dan vida a estas escenas. En la tumba de Unsu se aprecian campesinos escardando, echando

semillas, cosechando con hoces y cargando grano cortado en alforjas para ser trillado por bueyes (figura 3.10). Las inscripciones de la tumba de Paheri expresan con elocuencia la realidad y los límites energéticos de la época (James, 1984). Un capataz hostiga a los trabajadores: «¡Ánimo! ¡Moveos! El agua avanza y ya alcanza los fardos». Su respuesta —«¡El sol arde! Ojalá nos pague el precio de la cebada con pescado!»— resume perfectamente tanto su esfuerzo como su conciencia de que el grano destruido por las inundaciones puede ser compensado con pescado.

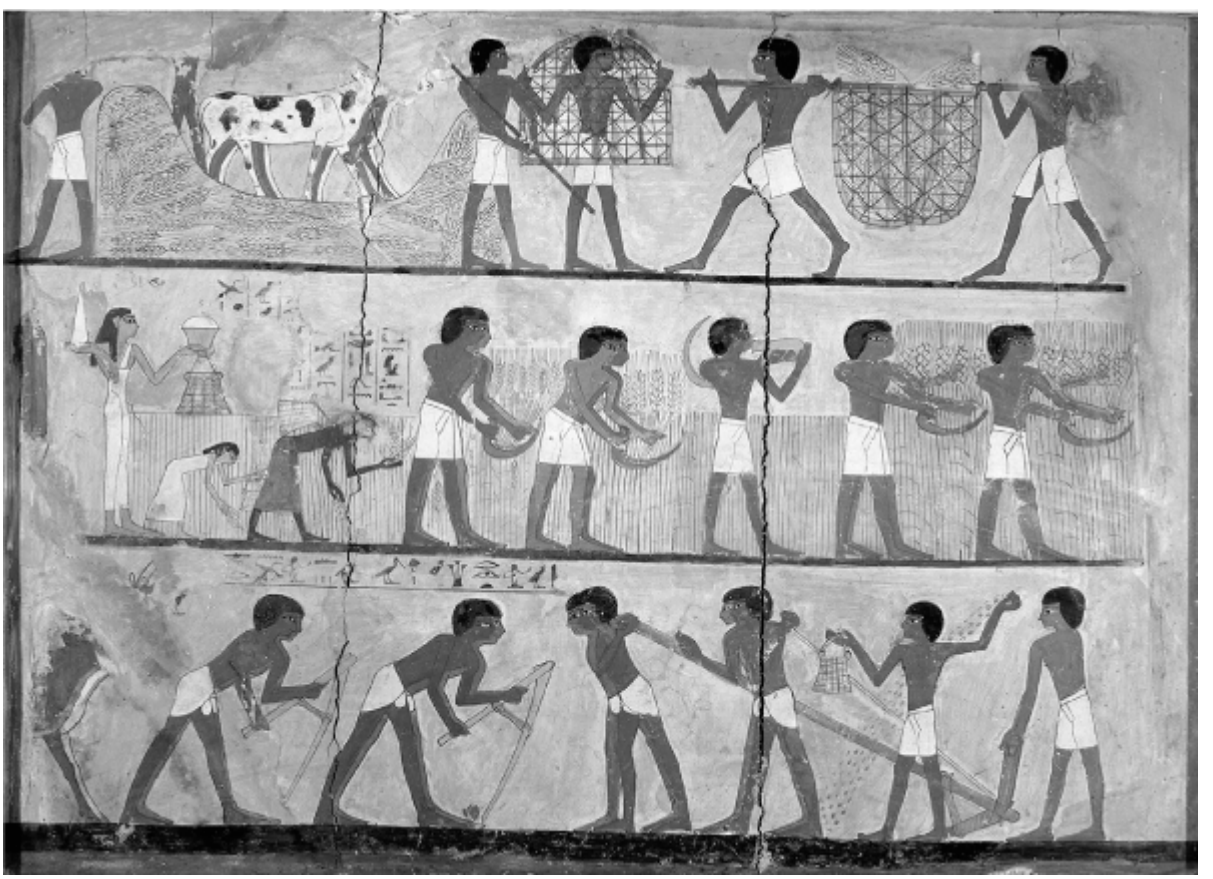


Figura 3.10 Escenas de actividades agrícolas egipcias durante la decimoctava dinastía (Imperio Nuevo) en la tumba de Unsu, al este de Tebas (Corbis).

El niño que azota a los bueyes trata de arrear a los animales que trabajan: «Trillad, por vuestro propio bien, trillad... Paja para vosotros y cebada para vuestros amos. ¡Que no se cansen vuestros corazones! Todo irá bien». Además de paja, los bueyes eran

alimentados con pajizo de trigo y cebada y pastaban hierba silvestre en la llanura aluvial y las arvejas cultivadas. A medida que el cultivo se intensificó, el ganado era regularmente conducido a las marismas del delta para pastar. Para arar, los bueyes eran enganchados con yugos de doble cabeza, los terrones eran quebrados con azadas y mazos de madera, y las semillas esparcidas eran pisadas por ovejas. Los registros del Imperio Antiguo no solo señalan la presencia de grandes cantidades de bueyes, sino también de importantes rebaños de vacas, burros, ovejas y cabras.

Según la reconstrucción de Butzer (1976) de la historia demográfica de Egipto, la densidad de población del valle del Nilo aumenta desde 1,3 personas/ha de tierra cultivable en 2500 a. C. hasta 1,8 personas/ha en 1250 a. C., y 2,4 personas/ha en el momento de la destrucción de Cartago por Roma (149-146 a. C.). Durante la conquista romana, la tierra cultivada total en Egipto era de 2,7 millones de ha, de las cuales un 60% en el delta del Nilo. Esta tierra podía producir cerca de 1,5 veces más alimento del que necesitaban sus casi 5 millones de personas. Este excedente fue muy importante para la prosperidad del Imperio romano en expansión: Egipto fue su mayor proveedor de cereales (Rickman, 1980; Erdkamp, 2005). Posteriormente, la agricultura egipcia disminuyó y se estancó.

De hecho, en la segunda década del siglo XIX Egipto cultivaba la mitad de tierra que durante la conquista romana, aunque, debido a la mejora de los rendimientos, esta tierra producía dos veces más alimento que toda la tierra cultivada dos milenios antes. La productividad aumentó rápidamente con la difusión del riego perenne cuando a partir de 1843 las primeras presas del Nilo proporcionaron cabezales hidráulicos adecuados para llevar agua hasta las redes de canales. El índice nacional de cultivos múltiples pasó de 1,1 durante la década de 1830 a 1,4 en 1900 y más de 1,5 durante la década de 1920 (Waterbury, 1979). La agricultura todavía funcionaba con energía humana y animal, pero gracias a los fertilizantes inorgánicos los *felahs* (campesinos egipcios) alimentaban a 6 personas/ha de tierra cultivada.

China

Aunque la China imperial también experimentó largos periodos de crisis y estancamiento, su agricultura tradicional fue considerablemente más innovadora que la egipcia (Ho, 1975; Bray, 1984; Lardy, 1983; Li, 2007). Como en otras regiones, las primeras etapas de la agricultura china no fueron del todo intensivas. Antes del siglo III a. C. no había riego a gran escala y poca o ninguna doble cosecha o rotación de cultivos. Los cultivos dominantes fueron el mijo seco en el norte y el arroz de secano en la cuenca inferior del Yangtsé. El primer animal domesticado fue el cerdo —las primeras pruebas arqueológicas tienen 8.000 años (Jing y Flad, 2002)—, que también era el animal más abundante, aunque las primeras pruebas claras de abonado datan de 400 a. C.

En la época en que Egipto suministraba cereales al Imperio romano (durante la dinastía Han, 206 a. C.-220 d. C.), los chinos desarrollaron varias herramientas y prácticas que tardarían siglos —o incluso más de un milenio— en llegar a Europa y Oriente Medio. Los avances más importantes fueron el arado de vertedera de hierro, la sembradora, la criba con ventilador y el arnés de pechera para caballos. Todas estas innovaciones se generalizaron durante la dinastía Han Anterior (207 a. C.-9 d. C.). La más importante de todas ellas fue la adopción generalizada del arado de vertedera de hierro.

Este tipo de arado, fabricado en masa con metal dúctil (cuya fundición se perfeccionó en el siglo III a. C.), facilitó el trabajo pesado y amplió las opciones de cultivo. Aunque era más pesado que el arado de madera, generaba mucha menos fricción y podía ser tirado por un único animal, incluso en suelos arcillosos encharcados. La sembradora multitubo redujo el desperdicio de semillas asociado con la transmisión manual, mientras que los ventiladores de manivela redujeron considerablemente el tiempo necesario para limpiar el grano trillado. A pesar de su eficiencia, el arnés de pechera no supuso una gran diferencia en el trabajo de campo porque en el norte del país (muy pobre) los bueyes siguieron siendo más asequibles que los

caballos (cuya alimentación requería forraje o grano), mientras que en los campos inundados del sur solo se utilizaban búfalos de agua enganchados con yugos de doble cabeza.

Ningún otro periodo dinástico introdujo mejoras agrícolas comparables a las del periodo Han (Xu y Dull, 1980). El progreso posterior fue lento. A partir del siglo XIV, las técnicas agrícolas se estancaron. Más de la mitad del aumento de la producción de grano entre la dinastía Ming (1368-1644) y el periodo inicial de la dinastía Qing (1644-1911) provino de la expansión del área cultivada (Perkins, 1969). El resto tuvo que ver con el crecimiento de la mano de obra (sobre todo para riego y fertilización). En algunas regiones, el uso de mejores semillas y nuevos cultivos (en particular el maíz) también supuso una pequeña diferencia.

Indudablemente, la contribución más importante y duradera al cultivo intensivo en China fueron el diseño, la construcción y el mantenimiento de sistemas de riego extensivos (figura 3.11). Se trata de sistemas de riego muy antiguos. De hecho, casi la mitad de sistemas en funcionamiento en 1900 fueron completados antes de 1500 (Perkins, 1969). Los orígenes del que quizá sea el proyecto más famoso —el Dujiangyan, en la provincia de Sichuan—, que todavía riega campos donde se cultivan alimentos para varias decenas de millones de personas, se remontan al siglo III a. C. (UNESCO, 2015b). Para construirlo se cortó el lecho del río Min a la altura de la llanura de Dujiangyan y se bifurcó repetidamente la corriente con rocas en forma de punta de flecha en mitad del flujo.

Figura 3.11 Pequeña área de extensas terrazas de arroz de Longji (espalda de dragón) al norte de Guilin, en la región de Guangxi, cuyos orígenes se remontan a la dinastía Yuan (1271-1368). Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Longsheng_Rice_Terrace#/media.

Parte del agua era desviada hacia canales ramificados y su flujo regulado por diques y presas. La principal unidad constructiva utilizada eran cestas de bambú tejido llenas de rocas. El dragado y la reparación de diques durante las temporadas de estiaje han mantenido el sistema en funcionamiento durante más de 2.000 años. La construcción y el constante mantenimiento de este tipo de proyecto de riego (así como la construcción y dragado de largos canales de navegación) requirieron una importante inversión en capital, la movilización de una cantidad ingente de mano de obra y una elevada capacidad de planificación a largo plazo. Nada de esto hubiera sido posible sin una autoridad central eficaz. Es innegable que existió una

fuerte sinergia entre los impresionantes proyectos de gestión del agua en China y el surgimiento, el perfeccionamiento y la perpetuación de la burocracia jerárquica del país.

La elevación manual del agua siempre ha sido lenta y tediosa y su coste energético bastante alto. Por eso la recompensa por alcanzar un mejor rendimiento también resulta significativa. Cuando el riego suministraba agua adicional a los cultivos durante su periodo crítico de crecimiento, su retorno energético alimentario neto (excluyendo el coste de construir y mantener canales de riego) alcanzaba fácilmente 30 (recuadro 3.9). E incluso subsanar carencias hídricas durante periodos de crecimiento menos sensibles podía tener un retorno de 20.

A finales del siglo XIX y principios del XX, en las regiones chinas de cultivo de arroz se utilizaban 10 t/ha de estiércol animal y humano. Se recogían enormes cantidades de desechos orgánicos en ciudades y pueblos y se trasladaban al campo, y se creó una gran industria de gestión y transporte de desechos. Los viajeros occidentales admiraban el uso masivo del abono en China. Curiosamente, parecían ignorar que este uso se correspondía con la experiencia europea antigua (King, 1927). En cualquier caso, ninguna cultura ha superado nunca la cantidad de desechos orgánicos que se utilizaron en la provincia de diques y estanques de Guangdong, en el sur de China, para respaldar la agricultura intensiva: entre 50 y 270 t/ha de excrementos de cerdo y humanos (Ruddle y Zhong, 1988).

El compostaje y uso regulares de muchos otros desechos orgánicos —desde pupas de gusanos de seda hasta lodo de canales y estanques, pasando por algas y tortas de prensa de semillas oleaginosas— aumentaron aún más la carga de trabajo de recogida, fermentación y distribución. No es sorprendente que al menos el 10% de toda la mano de obra china se dedicara a la gestión de fertilizantes. En la llanura del norte de China, la fertilización del trigo y la cebada era la actividad que más trabajo humano y animal requería (cerca de una quinta parte y un tercio del tiempo dedicado a dichos cultivos

respectivamente). Se trataba de una excelente inversión, con un retorno energético que solía ser superior a 50 (recuadro 3.10).

El retorno energético de la producción de alimentos en los cultivos tradicionales chinos nunca ha sido especialmente alto —ni siquiera durante su periodo de máximo rendimiento, durante las primeras décadas del siglo XX—. Ello se debe principalmente a la baja mecanización de los cultivos o, dicho de otra manera, a la preponderancia del trabajo humano. El acceso a una gran cantidad de información cuantitativa sobre casi todos los aspectos de la agricultura tradicional china durante las décadas de 1920 y 1930 (Buck, 1930: 1937) posibilita describir el sistema con detalle y ofrecer estadísticas energéticas precisas. La mayoría de campos eran muy pequeños (0,4 ha de media) y estaban a solo 5-10 minutos a pie de una granja. Casi la mitad de la tierra de cultivo se regaba, mientras que una cuarta parte estaba aterrazada.

Los cereales representaban más del 90% de la tierra cultivada, la patata dulce o boniato menos del 5%, las plantas fibrosas el 2% y las verduras un 1%. Solo una de cada tres granjas del norte tenía al menos un buey y menos de una de cada tres explotaciones del sur poseía un búfalo de agua. El cultivo requería la mayor parte del trabajo preliminar (un 90% para el arroz y un 70% para el trigo), a pesar de que, excepto para arar y desgarrar, el trabajo de campo chino utilizaba casi exclusivamente trabajo humano. Tanto los bueyes como los búfalos de agua eran alimentados casi sin grano y, por tanto, los retornos de energía pueden calcularse simplemente considerando el trabajo humano. El trigo del norte no regado no solía producir más de 1 t/ha, requería más de 600 h de trabajo y generaba 25-30 unidades de energía alimentaria en granos no molidos por cada unidad de energía alimentaria necesaria para el trabajo de campo y el procesamiento de cultivos.

RECUADRO 3.9

Retorno energético de la fertilización

Una buena cosecha de trigo de invierno de finales de la dinastía Qing de 1,5 t/ha requería 300 h de trabajo humano y 250 de trabajo animal. La fertilización suponía, respectivamente, el 17% y el 40% del total. Supongo de manera conservadora que las 10 t/ha de fertilizante utilizado solo contenían un 0,5% de nitrógeno (Smil, 2001). Tras las pérdidas de lixiviación y volatilización, solo quedaría la mitad del nitrógeno para el cultivo. Cada kg de nitrógeno genera una producción adicional de 10 kg de grano. En comparación con un cultivo no fertilizado, hay un incremento del rendimiento de al menos 250 kg de grano. Solo el 3-4% de este grano se utilizaba como alimento para animales. Después de la molienda, el grano producía al menos 200 kg de harina, es decir, 2,8 GJ de energía alimentaria, en comparación con una inversión de aproximadamente 40 MJ de alimento adicional para el trabajo humano. Por tanto, el retorno energético de la fertilización era de alrededor de 70, una relación coste/beneficio realmente impresionante.

El rendimiento local y regional del cultivo de arroz ya era relativamente alto durante la dinastía Ming, y durante las primeras décadas del siglo XX la media nacional fue de 2,5 t/ha, solo superada por Japón. Había que invertir 2.000 horas de trabajo para producir la cosecha, generando un retorno energético bruto de 20-25. El retorno del maíz era de hasta 40, pero la harina de maíz nunca fue un alimento muy apreciado en China. El retorno de las leguminosas grano (soja, guisantes, judías) rara vez era superior a 15 y solía situarse en torno a 10, igual que el de los aceites vegetales prensados de colza, cacahuete y semillas de sésamo. Los cereales suministraban el 90% de toda la energía alimentaria y el consumo de carne en el campesinado era insignificante (estaba reservado a ocasiones especiales). A pesar de todo, esta monótona dieta vegetariana fue perfectamente compatible con altas densidades de población.

La densidad de población de los antiguos chinos no pudo ser muy diferente a la de los egipcios (entre 1 persona/ha en las regiones más pobres del norte y más de 2 en los arrozales del sur). Por otro lado,

existieron grandes diferencias intrarregionales: durante los primeros dos siglos de la dinastía Qing hubo mucha inmigración en el noroeste, mientras que en el sur, más montañoso, la densidad de población era muy baja. La gradual intensificación de los cultivos, combinada con una dieta sencilla, posibilitó densidades mucho más altas. La reconstrucción aproximada de las dinastías Ming (1368-1644) y Qing (1644-1911) indica una evolución desde 2,8 personas/ha de tierra cultivada en 1400 hasta 4,8 personas/ha en 1600 (Perkins, 1969). Durante el próspero reinado de Qianlong (1736-1796) la densidad se redujo ligeramente debido a la expansión de la población y la creación de nuevas tierras de cultivo. Durante el siglo XIX se reanudó el aumento de la densidad de población y al final del siglo la tasa media era superior a 5 personas/ha, más que la media actual de la isla de Java y un 40% superior a la media en India (figura 3.12).

Las encuestas de Buck (1937) de principios de la década de 1930 indican un promedio nacional de al menos 5,5 personas/ha de tierra cultivada. Este promedio es parecido al de Egipto hoy en día, aunque en Egipto se riega la tierra y se utilizan fertilizantes inorgánicos. En contraste, la productividad media de los cultivos a nivel nacional en China se veía reducida por la agricultura de secano del norte. En 1800 la región arrocera del sur ya superaba las 5 personas/ha. Y en 1930 gran parte de esta sostenía a más de 7 personas/ha. Comparada con el cultivo de trigo de secano, el retorno del cultivo de arroz húmedo era más bajo, aunque esta limitación era más que contrarrestada por el mayor rendimiento por hectárea: en las regiones más fértiles, el cultivo doble de arroz y trigo podía alimentar a 12-15 personas/ha.

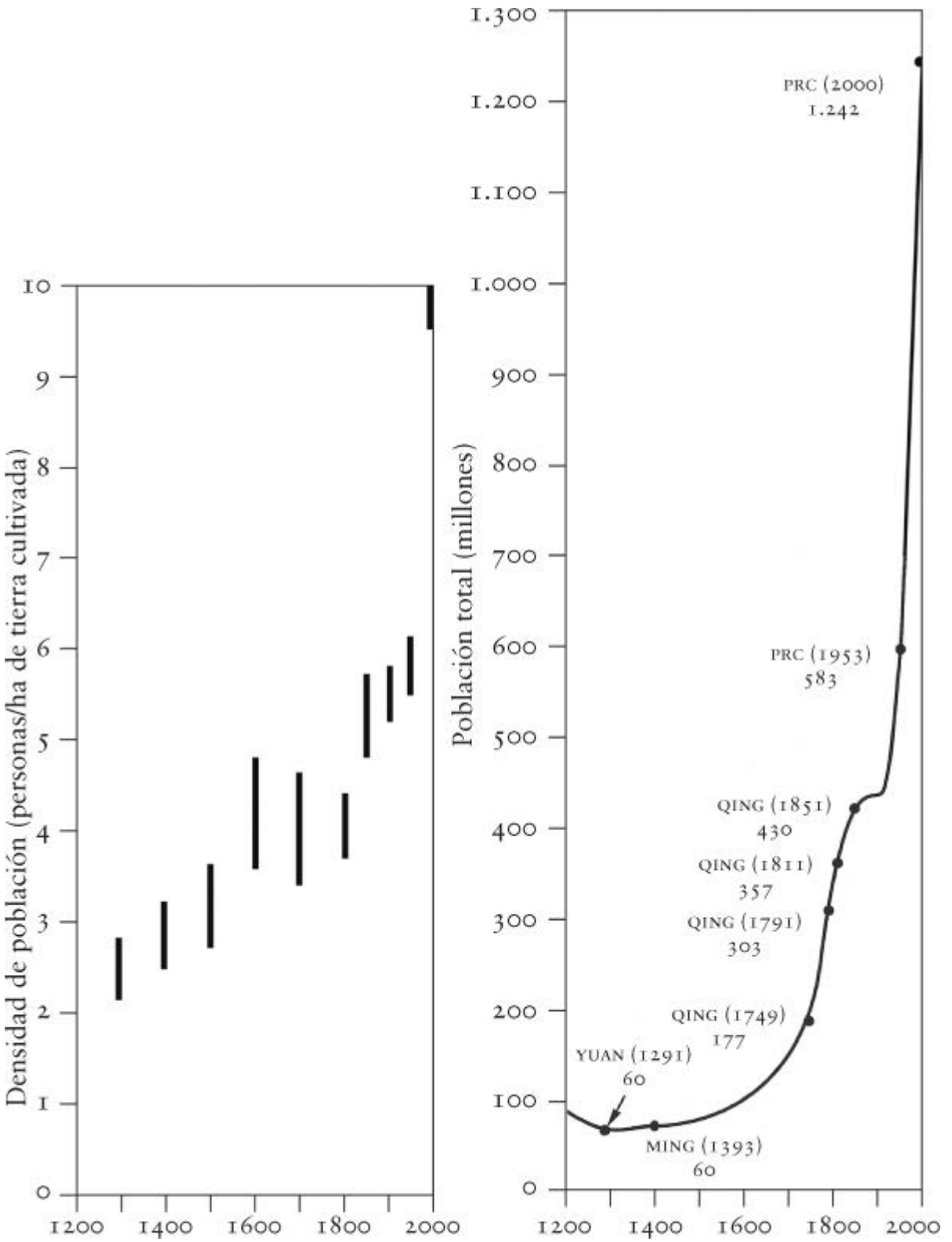


Figura 3.12 Densidad de población de China entre 1200 y 2000. La sustancial expansión de tierra cultivada durante la dinastía Qing fue rápidamente compensada y después ampliamente superada por el continuo crecimiento de la población del

país. Las barras de densidad muestran la incertidumbre de las estimaciones históricas. Creado con datos de Perkins (1969) y Smil (2004).

Culturas mesoamericanas

La agricultura de las civilizaciones mesoamericanas clásicas no empleaba ni animales de tiro ni arado y, por consiguiente, difirió sustancialmente de la del Viejo Mundo. Con todo, también logró intensificar sus métodos de cultivo y alcanzar una densidad de población impresionantemente alta. Además, domesticaron plantas que hoy en día se cultivan en todo el mundo, sobre todo el maíz, los pimientos (*Capsicum annuum*) y los tomates (*Solanum lycopersicum*). El cultivo no alimentario más importante originario de Mesoamérica es el algodón (*Gossypium barbadense*). El análisis molecular indica que la domesticación original del algodón tuvo lugar en la península de Yucatán, mientras que el acervo genético de los cultivares modernos de algodón tiene su origen en el sur de México y Guatemala (Wendel *et al*., 1999).

Los mayores éxitos agrícolas tuvieron lugar en las tierras bajas tropicales y las tierras altas de Chiapas y Guatemala. Aunque tuvieron mucha interacción entre sí y compartieron un mismo cultivo básico (el maíz), los pueblos mesoamericanos tienen historias muy diferentes. Las razones del declive de la cultura maya tropical siguen siendo polémicas (Haug *et al*., 2003; Demarest, 2004), mientras que la cultura mexicana fue destruida por la invasión española (Leon, 1998). La sociedad maya se desarrolló de manera gradual durante mucho tiempo antes del comienzo del periodo clásico, alrededor del año 300. En la región que abarca el Yucatán actual, Guatemala y Belice se desarrolló una civilización compleja hasta más o menos el año 1000. Después se dio uno de los giros más enigmáticos de la historia mundial: la sociedad maya clásica se desintegró y su población pasó de tres millones de personas durante el siglo VIII a unas 100.000 en el momento de la conquista española (Turner, 1990).

Se ha sugerido que las malas prácticas agrícolas —la excesiva erosión del suelo y el colapso de la gestión del agua— fueron una de las razones del colapso maya (Gill, 2000). En sus primeras etapas de desarrollo, los mayas fueron cultivadores itinerantes. Con el tiempo, adoptaron formas intensivas de cultivo (Turner, 1990). Los mayas de las tierras altas construyeron amplias terrazas con paredes de roca que conservaban el agua y evitaban la erosión excesiva en las pendientes cultivadas de manera continua. Los mayas de las tierras bajas construyeron impresionantes redes de canales y elevaron campos por encima del nivel de la llanura para evitar inundaciones estacionales. Los antiguos campos elevados mayas —algunos de los cuales tienen más de 2.400 años— todavía se observan en las fotografías aéreas modernas. De hecho, su clara identificación y datación durante la década de 1970 refutaron la idea dominante de que los mayas se limitaron a la agricultura itinerante (Harrison y Turner, 1978).

En la cuenca de México se desarrollaron distintas culturas complejas: los teotihuacanos (100 a. C.-850 d. C.), los toltecas (960-1168) y, desde principios del siglo XIV, los aztecas (Tenochtitlan fue fundada en 1325). La transición de la caza y recolección a la agricultura sedentaria fue larga. La gestión del agua —que comenzó a principios de la era de Teotihuacán— permitió la intensificación de los cultivos y evolucionó gradualmente de tal manera que en el momento de la conquista española al menos un tercio de la población de la región dependía de ella para su alimentación (Sanders, Parsons, y Santley, 1979).

La irrigación permanente de los canales alrededor de Teotihuacán pudo dar de comer a 100.000 personas. Pero el cultivo más intensivo de Mesoamérica se basaba en las chinampas (Parsons, 1976), campos rectangulares elevados entre 1,5 y 1,8 metros por encima del nivel de las aguas poco profundas de los lagos Texcoco, Chalco y Xochimilco. Se construían con lodo, residuos de cultivo, hierbajos y algas. Sus ricos suelos aluviales se cultivaban continuamente —o con solo unos pocos meses de descanso— y sus bordes estaban reforzados con árboles. Las

chinampas convirtieron pantanos improductivos en jardines y campos de alto rendimiento y resolvieron el problema del anegamiento del suelo. El uso de barcas facilitaba mucho el transporte de las cosechas a los mercados de la ciudad. Las chinampas generaron un sobresaliente retorno respecto a la mano de obra invertida, lo que explica que su práctica —que comenzó en el año 100 a. C. y alcanzó su punto álgido durante las últimas décadas del Imperio azteca— fuera tan frecuente (recuadro 3.11).

RECUADRO 3.11

Campos elevados en la cuenca de México

Las chinampas podían rendir hasta cuatro veces más que el cultivo de secano. Después de restar una décima parte de semillas y desechos, una excelente cosecha de maíz de 3 t/ha producía 30 GJ más de energía alimentaria que una parcela de secano. Los campos se levantaban al menos a 1,5 m sobre el nivel del agua, por lo que 1 ha de chinampa requería acumular 15.000 m^3 de cieno y lodo. Un hombre trabajando 5-6 h/día apilaba no más de 2,5 m^3. El levantamiento de 1 ha de campo requería 6.000 días de trabajo. Suponiendo un coste energético del trabajo de 900 kJ/h, la tarea requería 30 GJ de energía alimentaria adicional, lo cual podía recuperarse en solo un año gracias al mayor rendimiento de la cosecha.

En el momento de la conquista española, los lagos de Texcoco, Chalco y Xochimilco tenían alrededor de 12.000 ha de chinampas (Sanders, Parsons y Santley, 1979). Su construcción requirió al menos 70 millones de días de trabajo. El campesino medio tenía que dedicar al menos 200 días al año al cultivo de alimentos para su familia, por lo que no podía invertir más de 100 días a grandes proyectos hidráulicos. Como buena parte de este tiempo tuvo que dedicarse al mantenimiento de los terraplenes y canales existentes, debían de necesitarse 60-120 campesinos estacionales para agregar 1 ha de chinampa. Aunque con medios diferentes, la cuenca prehispánica de

México fue una civilización tan hidráulica como la China Ming, su gran contemporáneo asiático. Los ingredientes clave de su éxito agrícola fueron un esfuerzo coordinado, bien planificado y a largo plazo y una enorme inversión en mano de obra.

El rendimiento del maíz de regadío es inherentemente superior al del trigo. Por eso la agricultura mesoamericana generó densidades de población muy elevadas. Una hectárea de chinampa de alto rendimiento podía alimentar 13-16 personas cuya energía alimentaria proviniera de los cereales en un 80%. Naturalmente, la media de la cuenca de México tomada en su conjunto fue considerablemente más baja, desde menos de 3 personas/ha en áreas marginales hasta 8 personas/ha en suelos bien drenados y regados de manera permanente (Sanders, Parsons y Santley, 1979). La población anterior a la conquista era de un millón de personas, usaba toda la tierra cultivable del valle y tenía una densidad media de 4 personas/ha. En los humedales cercanos al lago Titicaca, entre Perú y Bolivia, el cultivo de patata en campos elevados permitió alcanzar densidades muy parecidas (Denevan, 1982; Erickson, 1988).

Europa

Como China, Europa alternó periodos de mejora relativamente constante con otros de estancamiento de la productividad. Hubo grandes hambrunas en tiempos de paz hasta el siglo XIX. Hasta el siglo XVII la agricultura europea fue peor que la china. Siempre adoptó las innovaciones procedentes del este de manera tardía. La agricultura griega, de la que sabemos poco, no fue tan impresionante como su contraparte contemporánea en Oriente Medio. Los romanos desarrollaron de manera gradual una agricultura moderadamente compleja cuya descripción se conserva en los trabajos de Catón (*De agri cultura*), Varrón (*Rerum rusticarum libri III*), Columela (*De re rustica*) y Paladio (*Opus agriculturae*). Estos escritos se reimprimieron a menudo —su mejor edición en un único volumen crítico fue

publicada por Gesner (1735)— y ejercieron una influencia significativa hasta el siglo XVII (White, 1970; Fussell, 1972; Brunner, 1995).

A diferencia de las regiones centrales densamente pobladas de China, donde la elevada densidad de población y la escasez de tierras de pastoreo impidieron la propiedad extensiva de ganado, la agricultura europea siempre tuvo un fuerte componente de cría de animales. La agricultura mixta romana incluía rotaciones de cultivos de cereales y leguminosas, compostaje y uso de legumbres como abono verde. Solían reciclarse todos los desechos orgánicos posibles, desde la valoradísima excreta de paloma hasta las tortas de prensa. Los campos se encalaban con tiza o marga de manera frecuente para reducir la acidez del suelo. Al menos un tercio de los campos estaban en barbecho.

Los principales animales de tiro eran los bueyes (por lo general herrados). Los arados eran de madera y la siembra se hacía a mano y la cosecha con hoces. En ocasiones también se utilizaba una segadora mecánica gala descrita por Plinio y representada en algunos frescos que han llegado hasta nosotros. La trilla se realizaba con animales o mayales y el rendimiento era bajo y variable. La reconstrucción de los entrantes utilizados en el cultivo de trigo romano durante los primeros siglos de nuestra era arroja 180-250 h de trabajo humano y 200 h de trabajo animal para cosechas de 0,5 t/ha. Con todo, el retorno energético de la cosecha oscilaba entre 30 y 40 y solía ser bastante alto (recuadro 3.12).

La productividad de la agricultura europea mejoró muy despacio desde la desaparición del Imperio romano de Occidente hasta el comienzo de la gran expansión europea. A principios del siglo XIII, la producción de trigo no había sufrido cambios importantes y no sostenía densidades de población superiores a la media egipcia predinástica. Pero la Edad Media fue un periodo histórico en el que también se adoptaron importantes innovaciones técnicas (Seebohm, 1927; Lizerand, 1942; Slicher van Bath, 1963; Duby, 1968, 1998; Fussell, 1972; Grigg, 1992; Astill y Langdon, 1997; Olsson y

Svensson, 2011). Uno de los cambios más importantes fue la adopción del arnés de pechera para caballos de tiro.

Gracias a este arnés, los caballos reemplazaron poco a poco a los bueyes como principal animal de tiro en las regiones más ricas del continente. Aun así, la transición fue muy lenta y tardó siglos en terminar. En las regiones más ricas ocurrió entre el siglo XI —cuando la herradura y el arnés de pechera se convirtieron en la norma— y el XVI. En Inglaterra, los caballos solo representaban el 5% de los animales de tiro de propiedad en el momento del recuento de Domesday (1086) y cerca del 35% en explotaciones agrícolas (Langdon, 1986). En 1300 estos porcentajes eran respectivamente del 20% y el 45%. Tras un periodo de estancamiento, a finales del siglo XVI los caballos pasaron a ser la norma.

RECUADRO 3.12

Mano de obra en las cosechas de trigo europeas, 200-1800

	Horas de trabajo (personas/animales)/ha de trigo		
Tareas	**Italia, 200**	**Inglaterra, 1200**	**Holanda, 1800**
Arado			
Bueyes	37/74	25/150	
Caballos			15/30
Rastrillado	8/16	7/14	5/10
Siembra			
Siembra a mano	4/-	4/-	
Sembradora			3/6
Abonado			40/60
Cosecha			

Hoz	50/-	50/-	
Guadaña			24/-
Transporte	15/30	10/20	7/14
Trilla			
Pisoteo (bueyes)	30/60		
Mayal		30/-	33/-
Criba	25/-	25/-	30/-
Medición, almacenaje	8/-	7/-	10/-

Fuentes: creado a partir de Baars (1973), Seebohm (1927), White (1970), Stanhill (1976) y Langdon (1986).

La relativa riqueza de los datos ingleses ilustra la complejidad de la transición. Durante mucho tiempo hubo equipos mixtos de bueyes y caballos (estos últimos servían como referentes). Cada región avanzó a un ritmo distinto (la región de Anglia oriental siempre estuvo muy por delante del resto del país). Los pequeños propietarios fueron mucho más proclives a utilizar caballos en sus granjas que los grandes. La combinación de factores como el tipo de suelo dominante (las arcillas favorecían a los bueyes), la disponibilidad de alimento (la abundancia de tierras de pastoreo también favorecía a los bueyes) y el acceso a los mercados para comprar buenos animales de tiro y vender carne (la proximidad a las ciudades favorecía a los caballos) generó resultados complejos. Otros factores compensatorios incluyeron el conservadurismo, la resistencia al cambio, la búsqueda de costes operativos más bajos y el espíritu de innovación. La transición fue todavía más difícil debido al diseño deficiente de los arados y la debilidad de la mayoría de caballos de la Edad Media.

La combinación de suelas anchas de madera, ruedas pesadas de madera y grandes arados de vertedera de madera generaba una enorme fricción. En suelos húmedos era frecuente utilizar 4-6 animales (fueran bueyes o caballos) para superar esta dificultad. A pesar de su relativa ineficiencia, la combinación de arados de vertedera planos y equipos de animales más grandes (incluyendo cada vez más caballos) fue esencial para cultivar una mayor extensión de tierra. Al crear surcos y pequeñas elevaciones, el arado de vertedera creó un patrón eficaz de drenaje artificial. Aunque sin duda era mucho menos espectacular que las chinampas, este método de control del exceso de agua en el campo tuvo repercusiones históricas y geográficas mucho más importantes. El arado de vertedera abrió las extensas llanuras anegadas del norte de Europa al cultivo de trigo y cebada provenientes del entorno seco de Oriente Medio.

A finales de la Edad Media, los asentamientos alemanes fijaban la frontera oriental del arado de vertedera en Europa. La técnica solo alcanzó las llanuras europeas situadas entre el mar del Norte y los Urales, así como la mayor parte de los Balcanes, en el siglo XIX. Su uso supuso un cambio revolucionario: garantizó el progreso agrícola en el noroeste y el centro de Europa y los países bálticos y fue una de las claves de la prosperidad agrícola de las llanuras frías y húmedas. Los caballos de tiro más pesados, habituales en las carreteras y granjas europeas durante el siglo XIX, fueron producto de muchos siglos de cría (Villiers, 1976). Pero el progreso fue lento: los caballos medievales no eran mucho más grandes que sus predecesores romanos (Langdon, 1986). Incluso al finalizar la Edad Media, la mayoría de caballos no superaba 13-14 manos. Y su fuerza de tiro solo aumentó de manera significativa a partir del siglo XVII, cuando empezaron a ser habituales caballos de 16-17 manos y 1 t de peso (figura 3.13).

Esto explica que en Inglaterra durante la Edad Media fuera tan habitual considerar que los caballos eran inútiles en suelos arcillosos pesados. En cambio, durante el siglo XIX los caballos de tiro pesados

sobresalieron en tierras húmedas, suelos pesados y terrenos irregulares. En esa época, un par de buenos caballos podía realizar con facilidad un 25-30% más de trabajo de campo al día que un equipo de cuatro bueyes. Esto generó tres formas de intensificación: un cultivo más frecuente de los campos existentes (especialmente el arado de tierras en barbecho para matar las malas hierbas), el cultivo de nuevas tierras y la liberación de mano de obra para otras actividades. Y en muchas regiones europeas la rotación de cultivos pudo proporcionar fácilmente suficiente pienso concentrado para que el mantenimiento de un equipo de dos caballos fuera más barato que el de cuatro bueyes. Debido a la lentitud de la transición de bueyes a caballos, las grandes fluctuaciones regionales en la producción agrícola y la persistencia de cosechas muy pequeñas de granos básicos, es imposible atribuir una mejora constante de la productividad a la creciente presencia de caballos de tiro.

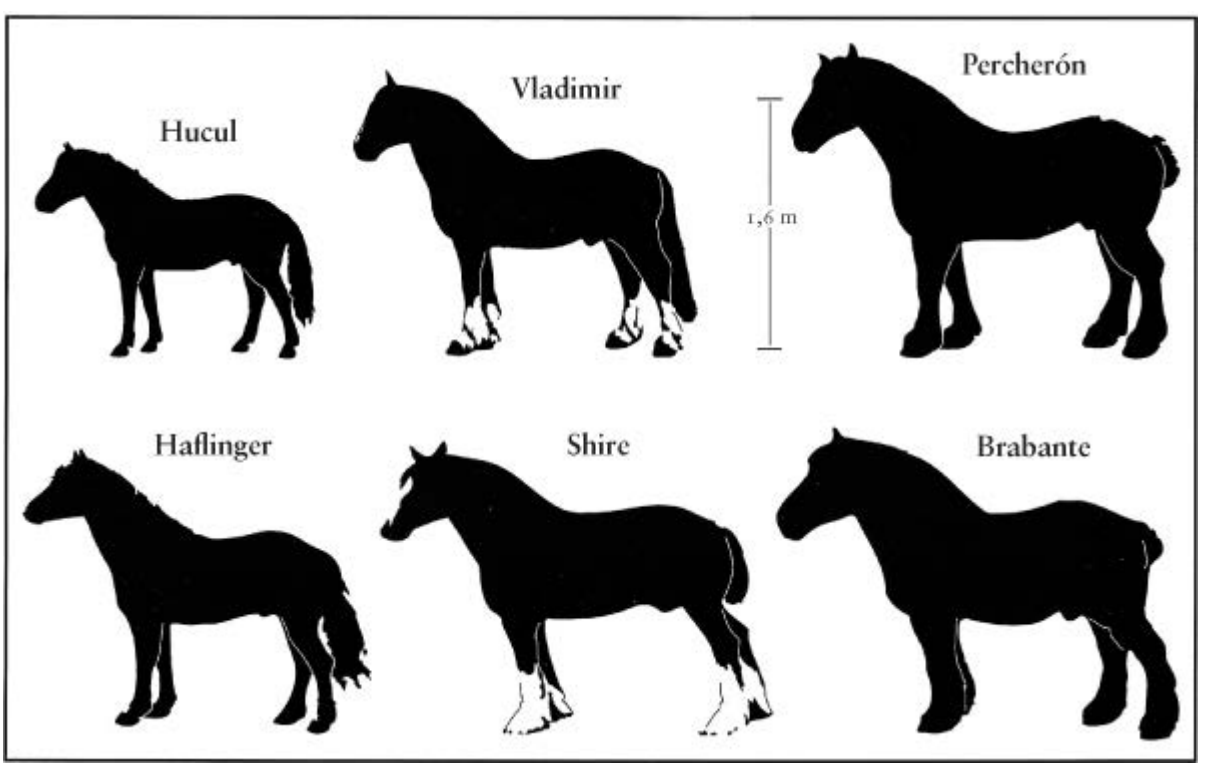


Figura 3.13 Los caballos de tiro europeos abarcaban desde animales tipo poni de menos de 12 manos de alto (1,2 m) hasta animales de más de 16 manos de alto y 1 t de peso. Las siluetas de animales están basadas en Silver (1976) y realizadas a escala.

Su superioridad solamente quedó clara cuando la mayoría de animales de tiro fueron caballos pesados y la agricultura devino mucho más intensificada durante los siglos XVII y XVIII. En el transporte por carretera, sus ventajas fueron evidentes mucho antes. Los caballos de tiro también plantearon un importante desafío de suministro de energía. La calidad de los arneses y las herraduras hizo posible un trabajo pesado que a su vez requería una mejor alimentación que el mero forraje (paja o pasto) que exigía el ganado de tiro. Los caballos más pesados necesitaban pienso concentrado, cereales o granos de leguminosas. En consecuencia, los agricultores tuvieron que producir más alimento para dar de comer tanto a sus familias como sus animales, y la agricultura intensiva nació en regiones donde la densidad de población aún era demasiado baja como para conseguirlo sin la necesidad de alimentar a los animales.

Podemos reconstruir las tendencias de producción a largo plazo en varios países gracias a la abundante disponibilidad de estadísticas históricas de precios (Abel, 1962). Aunque existieron diferencias regionales sustanciales, las fluctuaciones cíclicas a gran escala son inconfundibles. Los periodos de relativa prosperidad (en particular los periodos 1150-1300, el siglo XVI y 1750-1800) estuvieron marcados por extensas conversiones de humedales y bosques en campos. También estimularon la colonización de áreas remotas y generaron una mayor variedad de alimentos para complementar el pan (el alimento básico omnipresente). Los periodos de recesión económica y guerra trajeron consigo hambrunas, importantes declives poblacionales y el abandono de muchos campos y aldeas (Centre de Recherches Historiques, 1965; Beresford y Hurst, 1971). La guerra y distintas epidemias generaron importantes pérdidas de población en el siglo XIV. En las primeras décadas del siglo XV, la población europea se había reducido en más o menos un tercio respecto a 1300, y entre 1618 y 1648 Alemania perdió cerca de dos quintos de sus campesinos.

La inseguridad siguió siendo el principal atributo de la agricultura europea hasta finales del siglo XVIII. En las primeras décadas del siglo XIX, la miseria del campesinado todavía era evidente incluso en las regiones más ricas de Europa. En 1823, Cobbett (1824: 111), de viaje por Francia, se sorprendió al ver «¡Mujeres esparciendo estiércol con las manos!» y señaló que las herramientas agrícolas utilizadas en los campos franceses «parecen ser casi idénticas [...] a las que usábamos en Inglaterra hace muchísimos años, quizás un siglo». Poco después, el cultivo medianamente intensivo se transformó en la norma en la mayor parte de la Europa atlántica.

Sus señas de identidad fueron el abandono gradual del barbecho y la adopción generalizada de varias rotaciones de cultivos estándar. El cultivo de patatas se generalizó después de 1770, se expandió la producción ganadera y el uso de abono se intensificó. En Flandes, en el siglo XVIII, la aplicación anual de estiércol, excremento humano, tortas de prensa y ceniza alcanzó un promedio de 10 t/ha (Slicher van Bath, 1963). Los Países Bajos se convirtieron en líder europeo en productividad de cultivos. En 1800, las granjas holandesas cultivaban sobre todo trigo, así como cebada, avena, centeno, judías, guisantes, patata, colza, trébol y forraje verde; menos del 10% de las tierras de cultivo estaba en barbecho y todo ello se integró de manera estrecha con la producción ganadera (Baars, 1973).

Las horas de trabajo necesarias para cultivar 1 ha de trigo holandés no diferían mucho de las prácticas medievales o romanas. A medida que los caballos pesados reemplazaron a los bueyes, las horas de trabajo animal disminuyeron. Con todo, la mejora de los cultivares y la fertilización intensiva generaron un incremento del rendimiento de un 400% respecto a la Edad Media. Como resultado, el retorno energético neto de la agricultura holandesa de principios del siglo XIX fue de más de 160, en comparación con un retorno de menos de 40 en el cultivo de trigo medieval en Inglaterra o menos de 25 en el cultivo de cereales romano en Italia en el año 200 (recuadro 3.13).

La intensificación de la agricultura continuó en la mayoría de países europeos después de un periodo de depresión vinculado con la sobreproducción a principios del siglo XIX. Dos datos provenientes de Alemania ilustran esta progresión (Abel, 1962). En 1800, alrededor de un cuarto de los campos alemanes estaba en barbecho; en 1883, en cambio, la proporción era inferior al 10%. Antes de 1820, el consumo medio anual de carne por persona en Alemania era de menos de 20 kg; a finales del siglo XIX era de casi 50 kg. Las antiguas rotaciones de tres cultivos fueron reemplazadas por una variedad de secuencias de cuatro cultivos. Ya hemos mencionado el famoso ciclo de Norfolk: trigo, nabos, cebada y trébol. También se extendieron las rotaciones de seis cultivos. En las zonas más prósperas se hizo habitual la aplicación de sulfato de calcio y cal o marga para corregir la excesiva acidez del suelo.

La adopción de mejores herramientas también se aceleró durante el siglo XIX. Fue acompañada de un aumento del número de animales de tiro: entre 1815 y 1913 el total de caballos, bueyes y asnos (en equivalentes de caballo) aumentó un 15% en Reino Unido, un 27% en Países Bajos y un 57% en Alemania (Kander y Warde, 2011). Hacia 1850, el rendimiento aumentaba en todas las regiones agrícolas importantes: la agricultura, que se intensificaba rápidamente, suministraba alimentos a una población urbana cada vez más relevante. Después de siglos de fluctuación, en 1900 la densidad de población en las regiones de cultivo más intensivas del continente —Países Bajos y partes de Alemania, Francia e Inglaterra— alcanzó 7-10 personas/ha de tierra cultivable. Tales niveles ya reflejaban un considerable dopaje energético recibido indirectamente en forma de maquinaria y fertilizantes producidos con carbón. La agricultura europea de finales del siglo XIX se convirtió en un sistema energético híbrido: totalmente dependiente de los animales, pero cada vez más favorecido por la contribución de la energía fósil.

RECUADRO 3.13

Coste y rendimiento energético del cultivo de trigo en Europa, 200-1800

	Italia, 200	Inglaterra, 1200	Holanda, 1800
Horas de trabajo	177	158	167
Coste energético (MJ)	142	126	134
Rendimiento en granos (t/ha)	0,4	0,5	2,0
Rendimiento alimentario (GJ)	3,3	4,9	22,2
Retorno energético neto	23	39	166
Horas de trabajo animal	180	184	120

Fuentes: creado a partir de Seebohm (1927), White (1970), Baars (1973), Stanhill (1976), Langdon (1986) y Wrigley (2006).

América del Norte

La importancia de la agricultura norteamericana posrevolucionaria radica en su elevada —y acelerada— tasa de innovación, que generó las cosechas más eficientes del mundo en mano de obra a finales del siglo XIX (Ardrey, 1894; Rogin, 1931; Schlebecker, 1975; Cochrane, 1993; Hart, 2004; Mundlak, 2005). Durante las últimas décadas del siglo XVIII, en los estados del noreste —y más aún en los del sur— el cultivo no siguió el ritmo de progreso europeo. El arado de madera con reja de hierro forjado y vertedera de madera generaba mucha fricción innecesaria y tensión en los bueyes. La siembra se hacía a mano, la cosecha con hoz y la trilla con mayal (aunque en el sur también se usaba el pisoteo con animales).

En el siglo XIX la situación cambió por completo. El primer cambio importante se dio en el arado (Ardrey, 1894; Rogin, 1931). Charles

Neubold introdujo un arado de hierro fundido en 1797; las patentes de Jethro Wood (1814 y 1819) hicieron posible el arado con piezas intercambiables; y a principios de la década de 1830 una versión mejorada del arado de hierro fundido fue progresivamente reemplazada por el arado de acero. El primer arado de acero fue fabricado con hojas de sierra por John Lane en 1833. Su producción y posterior comercialización corrieron a cargo de John Deere, cuyo anuncio original de un arado de hierro forjado, en 1843, prometía que el metal, liso y pulido, «recorrería perfectamente cualquier suelo y no se asfixiaría ni en el más duro de ellos» (Magee, 2005).

La producción de acero barato en convertidores Thomas-Bessemer hizo que las vertederas fueran muy accesibles. En 1868, Lane introdujo el arado de acero laminado. Los arados con dos y tres ruedas también se hicieron comunes durante la década de 1860 (figura 3.14). El arado de varios cuerpos, unidos alrededor de un único marco —con hasta diez rejas y tirados por hasta doce caballos—, permitió abrir nuevas tierras de cultivo al norte de las Grandes Llanuras y en las praderas canadienses —en las provincias de Manitoba, Saskatchewan y Alberta— antes de finalizar el siglo. El cultivo de granos en las Grandes Llanuras fue posible gracias al uso de enormes arados de vertedera de acero.

Hubo avances igualmente importantes más allá del arado. En 1850 ya se utilizaban comúnmente sembradoras y aventadoras tiradas por caballos. Las primeras segadoras mecánicas fueron patentadas en Inglaterra entre 1799 y 1822. A partir de ellas dos inventores estadounidenses, Cyrus McCormick y Obed Hussey, desarrollaron máquinas producidas en serie a partir de la década de 1830 (Greeno, 1912; Aldrich, 2002). Durante la década de 1850 estas máquinas comenzaron a venderse en grandes cantidades y al finalizar la Guerra Civil había unas 250.000 en funcionamiento. La primera cosechadora —en la que dos hombres ataban el grano cortado— fue patentada en 1858 por C. W. y W. W. Marsh, mientras que la primera atadora mecánica de éxito fue introducida por John Appleby en 1878.

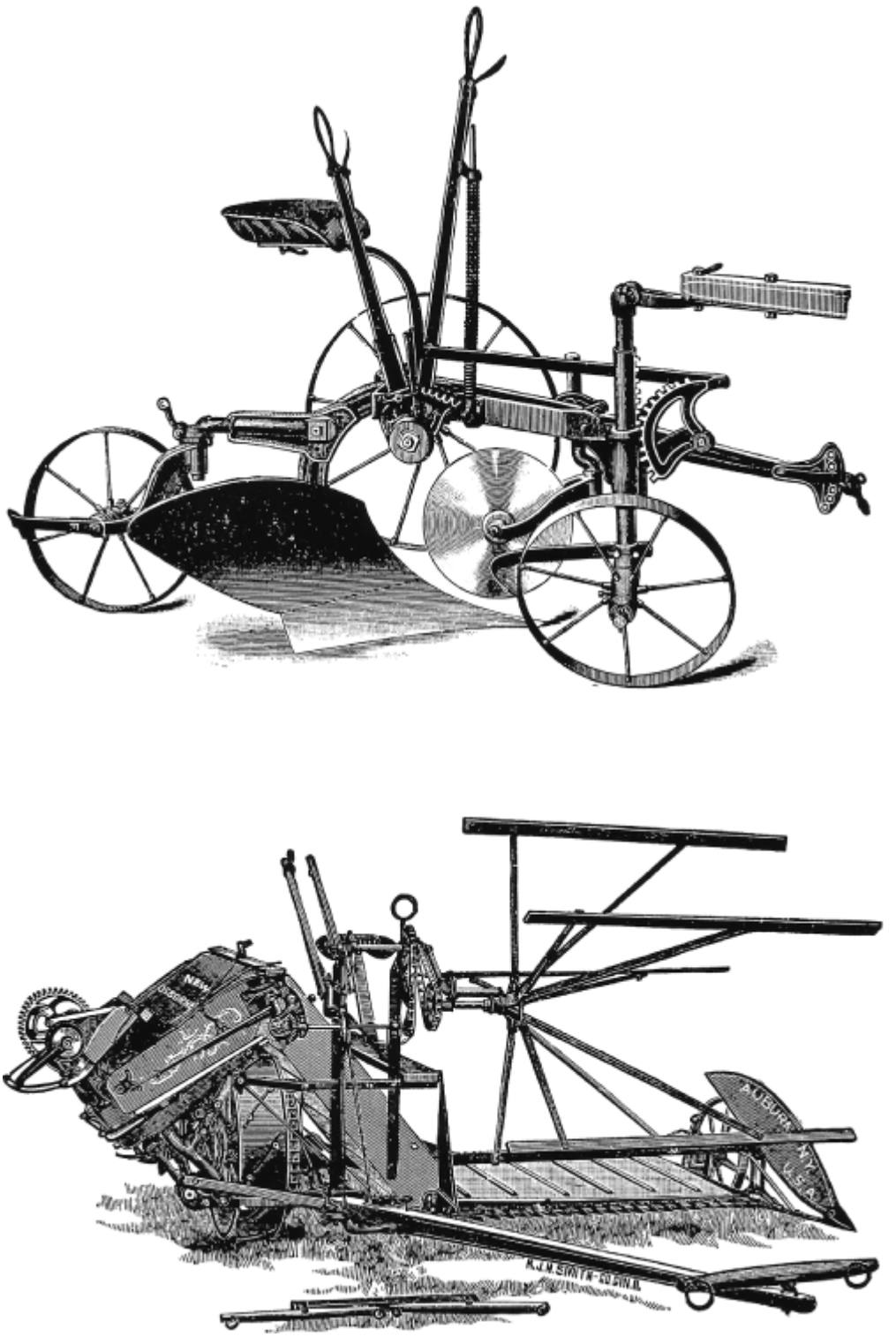


Figura 3.14 El arado de acero de tres ruedas (fabricado por Deere & Co. en Moline, Illinois, durante la década de 1880) y la primera cosechadora (fabricada a finales del siglo XIX en Auburn, Nueva York). Estas innovaciones hicieron posible el cultivo de

grano a gran escala en las Grandes Llanuras de Estados Unidos. Fuente: Ardrey (1894).

Era el último ingrediente necesario para la creación de una segadora-atadora (*grain harvester*) totalmente mecánica y capaz de descargar las gavillas atadas listas para la trilla (figura 3.14). La rápida difusión de este tipo de máquina antes del final del siglo XIX, junto con el uso de arados de varios cuerpos, facilitó la transformación de grandes extensiones de llanura en zonas de cultivo no solo en América del Norte, sino también en Argentina y Australia. Con todo, el rendimiento de la mejor segadora-atadora de la época se vio pronto sobrepasado por las combinadas (también conocidas como cosechadoras o segadoras-trilladoras) tiradas por caballos y comercializadas en California durante la década de 1880 por Stockton Works. En 1900, la Housers — que después de 1886 se convirtió en el modelo más vendido de la compañía— cortaba dos tercios del trigo de todo el estado (Cornways, 2015).

Las combinadas más grandes utilizaban hasta 40 caballos para cosechar 1 ha de trigo en menos de 40 minutos. Y puede decirse que llevaron la lógica de la tracción animal al límite, porque enganchar y guiar tantos caballos era realmente difícil. Su progresivo despliegue es el mejor reflejo de la gran transformación que la agricultura estadounidense protagonizó durante el siglo XIX. En 1800, cada agricultor (80 W) disponía de 800 W de potencia de tiro adicional (dos bueyes). En 1900, un agricultor californiano con una combinada disponía de 18.000 W (un equipo de 30 caballos), pasando así de ser una fuente directa de energía indispensable para la agricultura a un gestor de flujos de energía de terceros.

En 1800, los agricultores de Nueva Inglaterra —sembrando a mano, con arados de madera y gradas tradicionales tirados por bueyes, hoces y mayales— necesitaban 150-170 h de trabajo para producir una cosecha de trigo. En 1900, en California los arados de varios cuerpos, las rastras de dientes y las combinadas tirados por

caballos podían producir la misma cantidad de trigo en menos de 9 h (recuadro 3.14). En 1800, los agricultores de Nueva Inglaterra necesitaban más de siete minutos para producir 1 kg de trigo; en 1900, en el Valle Central de California se necesitaba menos de un minuto, lo que representa un aumento de la productividad de un 2.000% en un siglo.

RECUADRO 3.14

Requisito de mano de obra humana/animal (en horas/hectárea) y coste energético del trigo estadounidense, 1800-1900

Tareas	1800	1850	1875	1900
Arado				
Arado de madera	20/40			
Arado de hierro fundido		15/30		
Arado de acero			8/24	
Grupos de arados de acero				3/30
Desgarrado				
Grada tradicional	7/14			
Rastra de dientes		5/10	5/15	1/4
Siembra				
A mano	3/—			
Con sembradora		3/6	3/9	1/2
Cosecha				
Hoz	49/—			
Guadaña con rastrillo		25/—		
Atadora			11/6	
Combinada				3/17

Transporte	10/10	8/8	5/5	2/10
Trilla				
Con mayal	33/—			
Con aventadora		10/10	8/8	
Criba	40/—			
Horas de trabajo humano	162	66	40	9
Coste energético (MJ)	145	56	32	7
Retorno bruto de energía alimentaria	129	335	586	2.680
Retorno energético alimentario neto	90	270	500	2.400
Productividad del trabajo humano (min/kg de grano)	7,2	2,9	1,8	0,4

La primera secuencia (1800) representa un cultivo típico de Nueva Inglaterra en que 2 bueyes y 1-4 hombres realizan todas las tareas. La segunda secuencia (1850) muestra los avances de la agricultura centrada en la potencia de tiro de los caballos de mediados de siglo en Ohio. La tercera (1875) muestra más avances en Illinois. La última (1900) representa la forma más productiva de cultivo de trigo con caballos de Estados Unidos, en California. La tabla detalla las horas (hombres/animales) dedicadas al cultivo de trigo por hectárea. Debido a que el rendimiento del trigo estadounidense no mostró ninguna tendencia al alza durante el siglo XIX, asumo un rendimiento constante de 20 busheles por acre, es decir, 1,350 kg/ha (18,75 GJ/ha). Todos estos cálculos se basan en buena medida en los datos compilados por Rogin (1931).

En términos de coste neto de energía las diferencias fueron aún mayores: buena parte del mayor número de horas de trabajo requeridas en 1800 se dedicaban a tareas muy pesadas, como el arado a pie o el uso de la guadaña y el mayal. Además, las pérdidas de siembra y almacenamiento disminuyeron considerablemente a lo largo del siglo XIX. En 1900, cada unidad de energía alimentaria necesaria

para la labor agrícola producía unas 25 veces más energía comestible en forma de trigo que en 1800. Naturalmente, este progreso increíble no tiene que ver únicamente con la mejora de la maquinaria, sino también con la sustitución de músculos humanos por caballos de fuerza. Los inventores estadounidenses produjeron herramientas y máquinas muy eficientes, pero no lograron sustituir a los animales de tiro como motores primarios de la agricultura.

La trilla fue la única operación importante en la que los caballos fueron gradualmente reemplazados por máquinas de vapor. Por consiguiente, la rápida expansión de la agricultura estadounidense dependió del crecimiento del número de caballos y mulas disponibles. Generalmente se trataba de animales fuertes, grandes y bien alimentados cuyo coste energético era sorprendentemente alto. Hacia 1900, requerían un 50% más de energía alimentaria que los bueyes de Nueva Inglaterra en 1800, y no solo consumían heno o paja, sino también avena o maíz. El cultivo de grano para pienso redujo la producción para los seres humanos, y además es posible cuantificar este coste con bastante precisión (USDA, 1959). Durante las dos primeras décadas del siglo XX, el número de caballos y mulas estadounidenses se mantuvo estable en torno a 25 millones. El cultivo de alimento para su mantenimiento y trabajo consumía un cuarto de la tierra cultivada en el país (recuadro 3.15). Solo fue posible hacer frente a una demanda tan importante gracias a la abundancia de tierras de cultivo disponibles: en 1910, Estados Unidos disponía de casi 1,5 ha/persona, el doble que en 1990 y diez veces más que la China contemporánea.

Durante las últimas décadas del siglo XIX surgieron nuevos factores de mejora de la productividad. Durante la década de 1880, el consumo de carbón estadounidense superó por primera vez a la combustión de madera y el petróleo comenzó a cobrar importancia. La producción y distribución de herramientas, implementos y máquinas y el envío de productos agrícolas se volvieron dependientes del carbón y el petróleo. Los agricultores americanos dejaron de ser

meros gestores eficientes de flujos de energía solar renovable: su producción empezó a estar «dopada» por los combustibles fósiles.

LOS LÍMITES DE LA AGRICULTURA TRADICIONAL

El enorme contraste socioeconómico entre la vida humana durante la dinastía Qin —el primer periodo de unificación en China (221-207 a. C.)— y las últimas décadas del Imperio Qing (1644-1911), o entre la Galia romana y la Francia prerrevolucionaria, nos hace olvidar la inmutabilidad de los motores primarios y la persistencia de las prácticas de cultivo básicas a lo largo de milenios de historia preindustrial. Las poblaciones que dependieron únicamente del trabajo humano y animal, el reciclaje de residuos orgánicos y el cultivo de legumbres siempre crecieron mediante el uso más eficiente de la potencia de tiro animal y el desarrollo de prácticas de cultivo más intensas.

RECUADRO 3.15

Alimentación de los caballos de tiro en Estados Unidos

En 1910, en Estados Unidos había 24,2 millones de caballos y mulas de granja (y solo 1.000 tractores pequeños). En 1918, la población de animales de tiro alcanzó un pico de 26,7 millones y el número de tractores alcanzó los 85.000 (USBC, 1975). Con una necesidad diaria media de 4 kg de grano para los animales de tiro y 2 kg de pienso concentrado para el resto (Bailey, 1908), el requisito alimentario anual era de unas 30 Mt de avena y maíz. Con rendimientos de granos de 1,5 t/ha, era necesario sembrar al menos 20 Mha de granos para animales. En cuanto al forraje, los caballos de tiro necesitaban al menos 4 kg/día de heno, mientras que el resto podía mantenerse con 2,5 kg/día, lo que requería un total anual de unas 30 Mt de heno. Con un rendimiento medio de 3 t/ha, había que cosechar al menos 10 Mha de heno. Por tanto, la tierra dedicada a la alimentación de los caballos tuvo que representar no menos de 30 Mha, en comparación con las 125 Mha de tierra cosechada al año, lo que significa que la población de caballos de granja de

Estados Unidos (animales de tiro y ociosos) requería casi el 25% de la tierra cultivada del país. El cálculo del USDA (1959) arrojó un total casi idéntico de 29,1 Mha.

En regiones muy productivas, como el noroeste de Europa, el centro de Japón y las provincias costeras de China, el rendimiento se acercó al límite que imponían las tasas máximas de los flujos de energía y nutrientes disponibles a finales del siglo XIX. Al mismo tiempo, el progreso agrícola preindustrial mejoró muy poco la cosecha media. Además, incluso los mejores años no proporcionaba más que la dieta básica de subsistencia para la mayoría de la población, de tal modo que no pudo evitar la desnutrición crónica y hambrunas recurrentes. Las mejoras productivas, que fueron duraderas, resilientes y flexibles, también resultaron ser frágiles, vulnerables e inadecuadas a la hora de satisfacer las crecientes necesidades de la población.

Éxitos

El progreso de la agricultura tradicional fue lento y la adopción de nuevos métodos no hizo desaparecer por completo las viejas prácticas. En la Europa de finales del siglo XIX, los campos en barbecho, las guadañas y el enganche ineficiente de bueyes convivieron con los nuevos cultivos anuales, las combinadas y los equipos de caballos más eficientes. En un sistema que solo aprovechaba la potencia de tiro animal, la única manera de reducir el trabajo humano era utilizar más animales. Este cambio no requirió solo mejores técnicas de tiro, alimentación y crianza, sino también nuevas herramientas y máquinas capaces de sustituir la mano de obra humana en determinadas tareas.

Inicialmente el progreso fue muy lento. Durante el siglo XVI-II se aceleró notablemente. La comparación entre cultivos de trigo es el mejor indicador de progreso. Durante las primeras décadas del siglo XVIII, una hectárea de trigo en Europa y América del Norte requería casi 200 horas de trabajo humano (casi tanto tiempo como durante la

Alta Edad Media). En 1800, la media estadounidense era inferior a 150; en 1850 no alcanzaba las 100; al terminar el siglo era de menos de 40 y los métodos más modernos (los arados de varios cuerpos y las combinadas en California) requerían menos de 9 horas (figura 3.15).

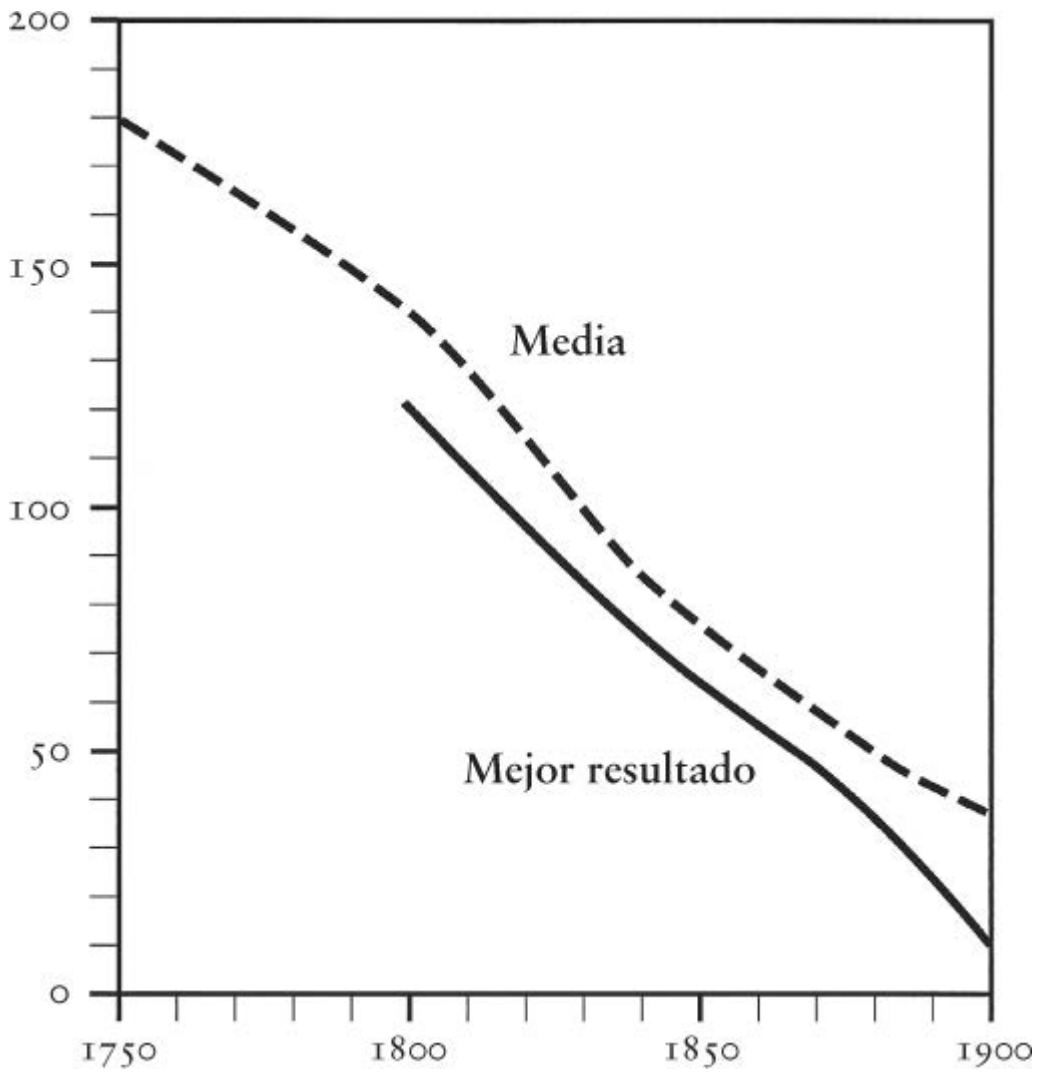


Figura 3.15 La mejora de la eficiencia del cultivo de trigo en Estados Unidos durante el siglo XIX puede representarse con precisión gracias a los datos compilados por Rogin (1931) y USDA (1959).

La gradual intensificación de la agricultura tradicional, lograda gracias a la sustitución de trabajo humano por animales de tiro, aumentó la productividad, pero durante mucho tiempo su efecto sobre el rendimiento medio fue apenas perceptible. Si bien la escasez e

inexactitud de la información disponible dificulta cualquier evaluación a largo plazo, es evidente que tanto en Europa como en Asia la norma fueron el estancamiento y la mejora marginal. Hasta el siglo XIX no existieron medias nacionales y regionales fiables. Muchas estadísticas europeas más antiguas hacen referencia al rendimiento relativo de las semillas plantadas (generalmente en volumen y no en masa). Como las semillas de la época eran más pequeñas que las variedades actuales (altamente fitomejoradas), la conversión entre volumen y masa es incierta. Además, incluso los mejores registros monásticos o privados tienen frecuentes lagunas y prácticamente todos ellos muestran amplias fluctuaciones anuales. Durante la Edad Media, eventos climáticos extremos podían generar rendimientos demasiado bajos como para producir siquiera suficiente semilla para la siguiente siembra.

Las mejores estimaciones disponibles indican que el rendimiento del trigo durante la temprana Edad Media era solo de 2. La mejor reconstrucción estadística de una tendencia nacional a largo plazo (los últimos siete siglos) es la de Inglaterra (Bennett, 1935; Stanhill, 1976; Clark, 1991; Brunt, 1999). En el siglo XIII el rendimiento de las semillas de trigo inglesas solía ser de 3-4, con máximos registrados de hasta 5,8. Esto se traduce en un rendimiento medio de poco más de 500 kg/ha. Un análisis cuidadoso de las pruebas disponibles para Inglaterra muestra que este rendimiento tan bajo solo logró doblarse de manera irreversible unos cinco siglos más tarde. El rendimiento del trigo inglés se mantuvo en un nivel parecido al medieval hasta 1600; después aumentó de forma constante.

La media nacional de 1500 se duplicó antes de 1800 y se triplicó hacia 1900, en buena medida como resultado del drenaje extensivo de la tierra y la adopción generalizada de la rotación de cultivos y el abono intensivo (figura. 3.16). En 1900 la agricultura británica ya se beneficiaba enormemente de maquinaria avanzada y aún más del rápido progreso de la economía nacional, impulsado por el aumento de la combustión del carbón. El efecto de la energía fósil también es

evidente en el caso holandés; en cambio, el rendimiento del trigo francés mostró una tendencia al alza mucho más leve incluso durante el siglo XIX, y en el caso del cultivo estadounidense —eficiente pero extensivo— en realidad hubo un declive del rendimiento (figura 3.16). De este modo, una hora de trabajo medieval producía de media 3-4 kg de grano, en 1800, 10 kg, y un siglo más tarde, 40 kg, con un rendimiento máximo muy superior a 100 kg.

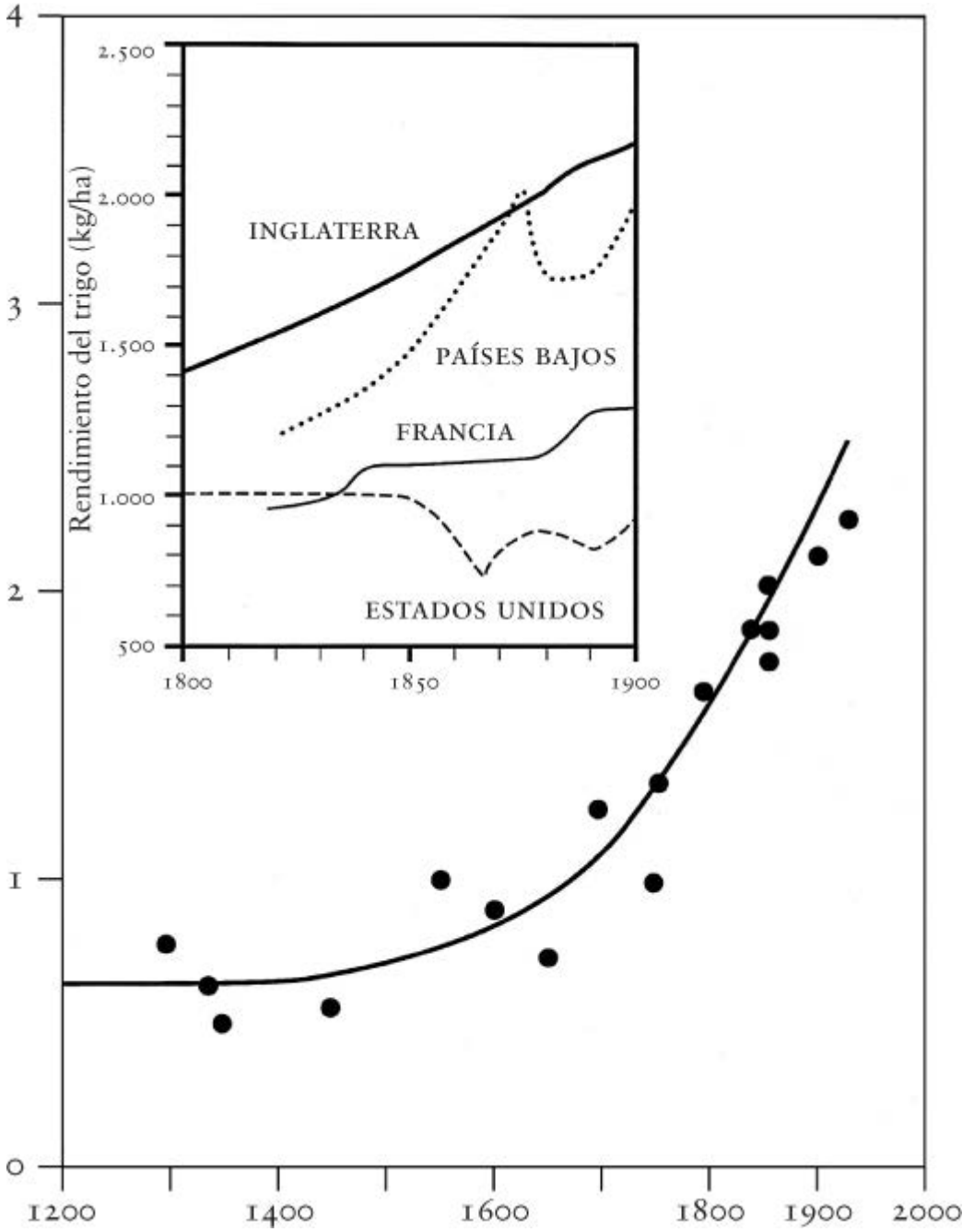


Figura 3.16 El rendimiento del trigo inglés se mantuvo estancado durante un largo periodo y despegó después de 1600. La mejora del rendimiento durante el siglo XIX fue aún más impresionante en los Países Bajos, pero marginal en Francia, mientras que en Estados Unidos la expansión de la agricultura de trigo hacia el oeste interior (más seco) redujo el rendimiento medio. Gráfico construido a partir de datos de USDA (1955), USBC (1975), Stanhill (1976), Clark (1991) y Palgrave Macmillan (2013).

El retorno energético aumentó un poco más rápido, ya que una hora de trabajo de campo de finales del siglo XIX requería menos esfuerzo físico que durante la Edad Media: el uso manual de un pesado arado de vertedera de madera tirado por bueyes requería un esfuerzo mucho mayor que manejar un arado de acero tirado por un equipo de potentes caballos. Una secuencia completa de cultivo de trigo a finales de la época romana o inicios de la Edad Media producía un retorno energético neto de 40 en forma de grano cosechado. A principios del siglo XIX, una buena cosecha de Europa occidental generaba 200 veces más energía en trigo de la que exigía su producción. A finales del siglo XIX, la proporción solía ser superior a 500 y los mejores rendimientos alcanzaban 2.500.

El retorno energético neto (después de restar el cuidado de las semillas y las pérdidas de almacenamiento) fue necesariamente menor: no más de 25 para una cosecha medieval habitual, 80-120 a principios del siglo XIX y 400-500 a finales del mismo siglo. Sin embargo, como la creciente productividad laboral fue posible gracias al despliegue de la potencia de tiro animal, también fue necesaria una inversión energética sustancial en alimentación animal. En el caso romano, cada unidad de potencia útil disponible generada por el trabajo humano se complementaba con ocho unidades de trabajo animal. En la Europa de principios del siglo XIX, la relación típica entre potencia humana y animal alcanzó 1:15. A finales de siglo, en las granjas estadounidenses más productivas ya estaba muy por encima de 1:100. El trabajo humano se convirtió en una fuente insignificante de energía mecánica y, de hecho, el valor del trabajo de los agricultores se desplazó hacia la gestión y la supervisión, tareas de bajo consumo energético pero mucho rendimiento.

El coste energético de la potencia de tiro creció aún más rápido. Una pareja de bueyes romanos consumía forraje: no necesitaba grano para realizar sus tareas de campo y, por tanto, su uso no reducía el suministro de grano disponible para los humanos. Una pareja de

caballos europeos de tamaño medio de principios del siglo XIX consumía casi 2 t de pienso al año (nueve veces el consumo de grano por persona). Durante la década de 1890, una docena de caballos estadounidenses potentes requerían 18 t/año de avena y maíz (80 veces el grano consumido por su amo). Solo unos pocos países con mucha tierra de cultivo disponible pudieron proporcionar tanto alimento. Alimentar a 12 caballos representaba 15 ha de tierra de cultivo. En 1900, una granja estadounidense de tamaño medio tenía 60 ha de tierra, pero solo un tercio eran tierras de cultivo. Incluso en Estados Unidos, es evidente que solo los grandes productores pudieron mantener doce y más animales de tiro (el promedio era de 3 caballos/granja) (USBC, 1975).

No todas las sociedades tradicionales pudieron utilizar más mano de obra animal para intensificar su agricultura. En el Asia arrocera, la norma fue la intensificación basada en el cultivo más elaborado de una cantidad limitada de tierra cultivable. Los ejemplos más notables de este modelo de desarrollo fueron Japón, partes de China y Vietnam y Java, la isla más densamente poblada del archipiélago indonesio. Este enfoque —acertadamente descrito como «involución agrícola» por Geertz (1963)— se basó en el elevado rendimiento potencial del arroz irrigado y la fuerte inversión energética que durante décadas y siglos significó la construcción y mantenimiento de sistemas de irrigación, campos inundados y terrazas.

A menudo, la intensificación de la agricultura de secano conduce a la degradación del entorno (sobre todo la erosión del suelo y la pérdida de nutrientes). Los agroecosistemas de arroz son mucho más resistentes. Su cultivo asiduo genera una enorme demanda de mano de obra humana. El proceso comienza con la cuidadosa nivelación de los campos y el germinado de las plántulas en viveros, e implica técnicas de microgestión tales como la plantación espaciada de manera hipercuidadosa, el deshierbe a mano y la cosecha de plantas una a una. Una vez establecida, es difícil truncar esta tendencia introversiva. El proceso genera densidades de población cada vez más altas, pero

también conduce a un empobrecimiento extremo. Primero la productividad de la mano de obra se estanca, y luego comienza a disminuir a medida que poblaciones más grandes dependen de dietas cada vez más modestas. Muchas regiones de China mostraron claros signos de involución agrícola durante las dinastías Ming y Qing.

Después de los conflictos de la primera mitad del siglo XX, la política maoísta basada en la agricultura comunal y el trabajo rural masivo perpetuó la involución hasta finales de la década de 1970. En esa época, en China había 800 millones de campesinos, que representaban más del 80% de la población; subsistían con raciones mínimas, aunque distribuidas de forma más equitativa. La tendencia se invirtió de manera radical a principios de los años 1980, con la abolición de las comunas por parte de Deng Xiaoping y la privatización *de facto* de la agricultura. Varios países arroceros asiáticos siguieron la misma espiral de involución incluso después de 1950. En cambio, Japón rompió la tendencia durante la Restauración Meiji, a partir de 1868. Entre 1870 y la década de 1940, la población del país se multiplicó por 2,2 —igual que el rendimiento medio del arroz— y la población rural se redujo a la mitad, esto es, un 40% del total (Taeuber, 1958).

Más allá de algunas diferencias fundamentales, los dos grandes patrones de intensificación de la agricultura —uno basado en la maximización del *input* de mano de obra humana y el otro en su sustitución por animales de tiro— tuvieron la misma consecuencia: el aumento (lento) de la densidad de población. Este proceso fue esencial para que una creciente proporción de la mano de obra pudiera dedicarse al trabajo no agrícola, tendencia que condujo a la especialización laboral, el crecimiento de los asentamientos y el surgimiento y la creciente complejidad de las civilizaciones urbanas.

Este proceso de cambio solo puede ser reconstruido de manera aproximada. Los totales poblacionales del pasado son muy inciertos, incluso en sociedades con una larga tradición de recuento relativamente exhaustivo (Whitmore *et al.*, 1990). Con todo,

encontrar datos fiables sobre la tierra cultivada es todavía más difícil, y más aún datos sobre la proporción de tierra cultivable realmente empleada para el cultivo. Por eso es imposible modelizar tendencias fiables de densidad de población. Lo que sí puede hacerse es contrastar el mínimo característico de la agricultura temprana con rendimientos típicos posteriores (derivados de registros escritos) y los hitos de las formas más intensivas de agricultura preindustrial (que están bien documentados).

La densidad media de las civilizaciones antiguas tomadas en su conjunto parece ser de alrededor de 1 persona/ha de tierra cultivable. Esta tasa solo se duplicó después de siglos y siglos de progreso lento. En Egipto el proceso requirió 2.000 años, y parece que tanto en China como Europa fue necesario un lapso de tiempo parecido (figura 3.17). En 1900, las mejores medias nacionales eran de 5 personas/ha, mientras que las regiones más productivas podían alcanzar máximos de más del doble. Durante el siglo XX, la tasa creció mucho más rápido: en 2000 había casi 25 personas/ha en Egipto, doce en China y tres en Europa. Aunque la comparación de densidades de población también debería tener en cuenta la adecuación nutricional y variedad de las dietas.

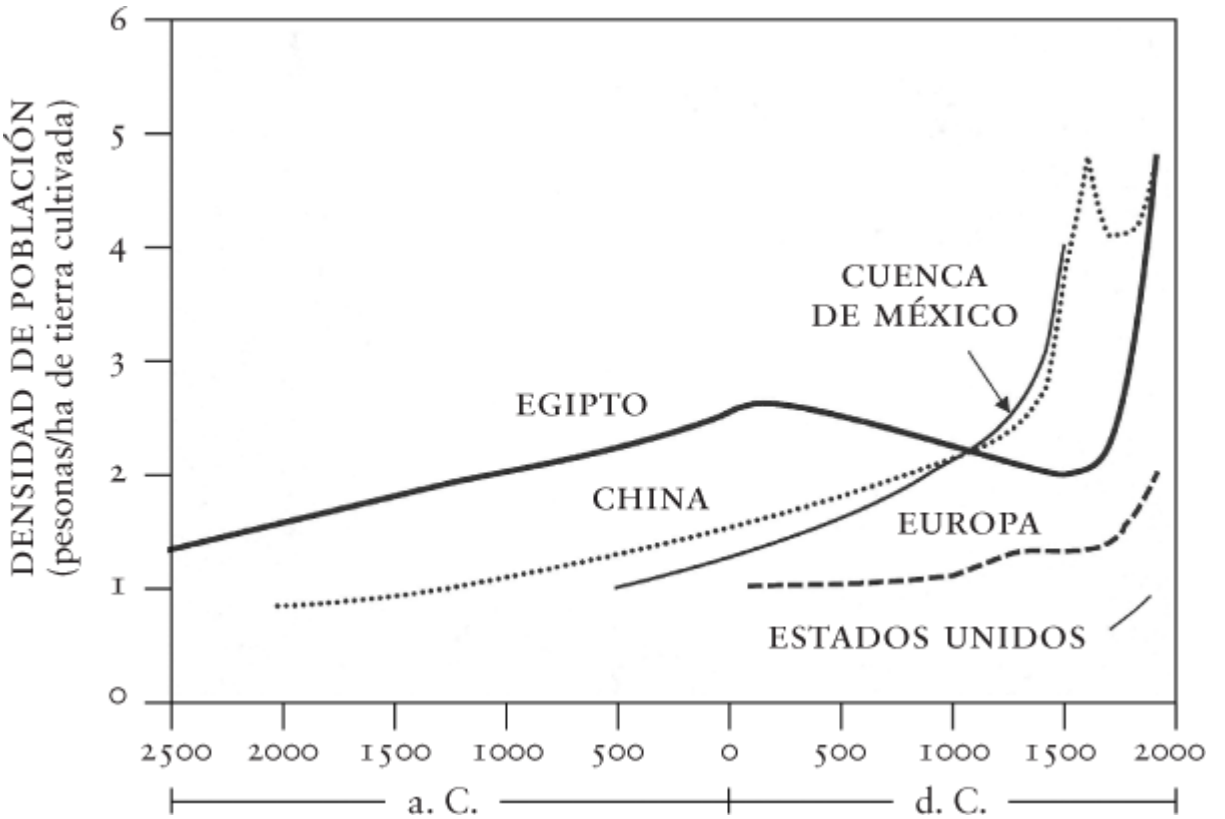


Figura 3.17 Densidad de población por hectárea de tierra cultivada en Egipto, China, la cuenca de México y Europa entre 2500 a. C. y 1900 d. C. Realizado con estimaciones y datos de Perkins (1969), Mitchell (1975), Butzer (1976), Waterbury (1979), Richards (1990) y Whitmore *et al.* (1990).

Nutrición

La densidad de población de las sociedades preindustriales dice poco sobre la adecuación y calidad de la dieta típica. El cálculo del requisito alimentario de una sociedad tradicional no puede hacerse de manera certera, porque deben hacerse demasiadas suposiciones para completar la información que falta. La estimación de la producción también debe basarse en supuestos acumulativos. Por otro lado, el consumo real también se vio afectado por elevadas —y muy variables — pérdidas de poscosecha. Tal vez la única generalización aceptable, basada en pruebas documentales y antropométricas, sea que no existe una clara tendencia al alza en el suministro de alimentos per cápita a lo largo de milenios de agricultura tradicional. En algunos aspectos,

algunas sociedades agrícolas antiguas parecen haber estado mejor (o igual de bien o mal) que sus sucesoras. Por ejemplo, la reconstrucción de antiquísimas cartillas de racionamiento en Mesopotamia, realizada por Ellison (1981), indica que el suministro diario de energía entre 3000 y 2400 a. C. era un 20% superior a la media de principios del siglo XX para la misma región.

Los cálculos basados en los registros de la dinastía Han muestran que, durante el siglo IV a. C., en el estado de Wei se esperaba que un campesino típico proveyera a los cinco miembros de su familia con casi 0,5 kg/persona/día de grano (Yates, 1990), un total idéntico a la media del norte de China durante la década de 1950, antes de la introducción del riego por bombeo y los fertilizadores sintéticos (Smil, 1981a). Las cifras más fiables de Europa al principio de la era moderna también muestran descensos notables en el consumo de alimentos básicos, incluso en ciudades con un acceso privilegiado a los alimentos. Por ejemplo, el suministro anual por persona de grano en Roma cayó de 290 kg a finales del siglo XVI a 200 kg en el año 1700, mientras que el consumo medio de carne por persona se redujo de casi 40 kg a 30 kg (Revel, 1979).

Muchas dietas antiguas también fueron más diversas que las modernas, ya que contenían más proteína animal proveniente de animales salvajes, aves y especies acuáticas. Este declive cualitativo no fue compensado por una disponibilidad más equitativa de alimentos básicos: las grandes desigualdades de consumo —tanto regionales como socioeconómicas— eran comunes a finales del siglo XVIII y persistieron hasta el siglo XIX. En las sociedades agrícolas tradicionales gran parte de la población —e incluso a menudo una mayoría de la misma— vivió con un suministro de alimentos insuficiente para llevar una vida sana y vigorosa.

En su estudio de 1797 sobre la situación de los pobres ingleses, Frederick Morton Eden descubrió que incluso en el sur del país (más

rico que el norte) los alimentos básicos eran solo pan seco y queso. En la casa de un trabajador de Leicester

> rara vez hay mantequilla, en ocasiones un poco de queso y algunos domingos, carne. [...] Con todo, el pan es el sostén indiscutible de la familia. Actualmente no tienen suficiente pan, y por eso sus hijos se hallan casi desnudos y medio muertos de hambre. (Eden, 1797, 227)

La reconstrucción de la ingesta de alimentos por parte de trabajadores rurales pobres ingleses y galeses mostró que entre 1787 y 1796 solo consumieron 8,3 kg de carne al año (Clark, Huberman y Lindert, 1995). En la década de 1860, el consumo de carne del 50% más pobre de la población inglesa apenas superaba los 10 kg (Fogel, 1991). Y en el este de Prusia, un tercio de la población rural no dispuso de suficiente pan hasta 1847 (Abel, 1962).

Incluso en tiempos de prosperidad relativa, la dieta típica —que proporcionaba una nutrición más que adecuada en términos de energía total y nutrientes básicos— era muy monótona y poco apetecible. En Europa, el pan (generalmente negro; con poca o ninguna harina de trigo en el norte), los granos gruesos (avena, cebada, alforfón), los nabos, la col y más tarde la patata fueron los alimentos básicos cotidianos. A menudo se combinaban en sopas y guisos finos. La cena no se distinguía del desayuno y la comida. La dieta rural típica de Asia estaba si cabe aún más dominada por unos pocos cereales. En la China premoderna, el mijo, el trigo, el arroz y el maíz suministraban más del 80% de la energía alimentaria. La situación en India era casi idéntica.

Las abundantes verduras y frutas de temporada eran las únicas capaces de romper regularmente esta monotonía. En Asia, los alimentos favoritos incluían coles, rábanos, cebollas, ajo, jengibre y peras, melocotones y naranjas. Las coles y cebollas también estaban entre los clásicos europeos, además de los nabos y las zanahorias; las

manzanas, peras, ciruelas y uvas representaron las cosechas de fruta más importantes. Las especies mesoamericanas más importantes fueron el tomate, el chayote, el chile, la papaya y el aguacate. La dieta rural típica asiática siempre fue abrumadoramente vegetariana, igual que la de las sociedades mesoamericanas, que —aparte de los perros— nunca tuvieron ningún animal domesticado de tamaño considerable. Algunas regiones de Europa, en cambio, disfrutaron de una ingesta de carne relativamente alta durante los periodos prósperos. Con todo, la dieta típica solo incluía pequeñas porciones de carne de manera ocasional. La proteína animal se consumía principalmente en forma de productos lácteos. Los asados, los guisos, la cerveza, los pasteles y el vino solían consumirse en ocasiones festivas, como fiestas religiosas, bodas o banquetes gremiales (Smil, 2013d).

Incluso cuando la dieta cotidiana suministraba suficiente energía y proteínas, podía presentar importantes deficiencias de vitaminas y minerales. La dieta mesopotámica, centrada en la cebada de alto rendimiento, carecía de suficiente vitamina A y C: existen inscripciones antiguas que hacen referencia a la ceguera y una enfermedad parecida al escorbuto (Ellison, 1981). Durante los milenios siguientes, estas dos deficiencias fueron comunes en muchas sociedades extratropicales. El consumo reducido de carne causó deficiencias crónicas de hierro en las regiones en las que no solían consumirse verduras de hoja verde. Las dietas centradas en el arroz generaban importantes déficits de calcio, especialmente durante el periodo de crecimiento de los niños; en el sur de China, la media era inferior al 50% de la ingesta diaria recomendada (Buck, 1937). Las dietas monótonas o inadecuadas y la malnutrición generalizada siguen siendo la norma en muchos países pobres donde la densidad de población ha superado con creces los límites sostenibles de cualquier forma de agricultura tradicional.

Límites

A pesar de la lenta evolución del rendimiento y la productividad laboral, la agricultura tradicional constituye un enorme éxito evolutivo. Sin cultivos permanentes no habría densidades de población elevadas, y sin ellas no habría culturas complejas. Incluso una cosecha ordinaria de grano básico podía alimentar a diez veces más personas que un área equivalente utilizada por agricultores itinerantes. Con todo, la densidad de población de la agricultura tradicional estaba claramente limitada por diversos factores. Además, el suministro medio de alimentos raramente superó el mínimo existencial, y el hambre estacional y las hambrunas recurrentes afectaron incluso a sociedades con densidades de población bajas, buenos suelos y buenas técnicas agrícolas.

El límite más habitual del proceso de sustitución de mano de obra humana por tracción animal fue el suministro de energía. La producción de pienso concentrado para los animales de tiro no podía comprometer la adecuada cosecha de granos. Incluso en regiones con una elevada disponibilidad de tierra cultivable y una extraordinaria capacidad de producción de alimentos, el proceso de sustitución no podría haber ido mucho más allá de los niveles estadounidenses de finales del siglo XIX. Los pesados arados de varios cuerpos y las combinadas llevaron el cultivo mediante tracción animal a su límite práctico. Además de la carga que suponía alimentar a tantos animales utilizados para periodos relativamente cortos de trabajo de campo, la estabulación, la limpieza y el herrado de los animales también exigía mucho trabajo. Enganchar y guiar grandes grupos de caballos también supuso un desafío logístico. Existía una necesidad evidente de un motor primario mucho más potente, y pronto aparecieron los motores de combustión interna.

La densidad de población límite de las sociedades que sufrieron una involución agrícola se alcanzó gracias a la habilidad para subsistir a pesar de la reducción gradual del retorno per cápita de la mano de obra humana. Con el tiempo, esta tendencia se vio limitada por la capacidad máxima de reciclaje de nitrógeno. La aplicación intensiva

de fuentes de nitrógeno tradicionales —el reciclaje de desechos orgánicos y la plantación de abonos verdes— proporcionó nutrientes suficientes para dar de comer a 12-15 personas/ha de tierra cultivada. La producción de estiércol nunca pudo superar el límite natural establecido por la disponibilidad de pienso para animales. En las regiones de cultivo intensivo procedía de los residuos de cultivo y la elaboración de alimentos. Además, el abono pesado y el uso de desechos humanos siempre requirieron un trabajo agotador y repetitivo de recogida, transporte y distribución de materia orgánica.

La única alternativa disponible y efectiva en todo el mundo consistió en rotar los cultivos que requerían fertilización con leguminosas. Sin embargo, también era una solución parcial. La siembra frecuente de leguminosas como abono verde permitía mantener la fertilidad del suelo, pero también reducía la producción anual de cereales básicos. Por regla general, las leguminosas grano pueden cultivarse sin un suministro externo de nitrógeno, pero solo son comparables con los cereales en términos de energía alimentaria bruta. Aunque tienen un alto contenido proteínico, son difíciles de digerir y a menudo tienen una baja palatabilidad. Además, no pueden utilizarse para hornear pan ni, salvo excepciones, hacer fideos. Desafortunadamente, uno de los cambios nutricionales más notables de las sociedades que se enriquecen es que reducen su consumo de legumbres.

Independientemente del periodo histórico, el medio ambiente o el modo predominante de cultivo e intensificación, ninguna agricultura tradicional logró eliminar la desnutrición generalizada ni las grandes hambrunas de manera sistemática. Las catástrofes naturales más recurrentes fueron las sequías e inundaciones. En la China de la década de 1920, los campesinos recordaban una media de tres cosechas fallidas a lo largo de su vida lo suficientemente importantes como para causar hambrunas (Buck, 1937).

Estas hambrunas duraron 10 meses de media y obligaron a un cuarto de la población afectada a comer corteza y hierba. Casi una

séptima parte de la población migró en busca de alimento. En la mayoría de sociedades asiáticas y africanas se observa un patrón similar. Algunas hambrunas fueron tan devastadoras que permanecieron en la memoria colectiva durante generaciones y provocaron importantes cambios sociales, económicos y agronómicos. Ejemplos notables de tales eventos son las cosechas fallidas de maíz provocadas por heladas y sequías en la cuenca de México entre 1450 y 1454 (Davies, 1987), el famoso colapso de los cultivos de patata infestados de *Phytophthora* en Irlanda entre 1845 y 1852 (Donnelly, 2005) y la gran hambruna india inducida por la sequía entre 1876 y 1879 (Seavoy, 1986; Davis, 2001).

¿Por qué las sociedades preindustriales no lograron protegerse mejor contra este tipo de crisis? Hubieran podido intentarlo —y, de hecho, nunca dejaron de hacerlo— cultivando más tierras, intensificando sus cultivos o haciendo ambas cosas. Sin embargo, en la inmensa mayoría de casos estas medidas se tomaban a regañadientes. Y se posponían durante tanto tiempo que los desastres naturales inevitablemente volvían a generar grandes hambrunas. Existe una explicación energética sencilla para este tipo de procrastinación. Tanto la extensión como la intensificación del cultivo requerían una mayor inversión de energía. Incluso en sociedades que podían permitirse disponer de más animales de tiro, buena parte de la inversión adicional provenía de más horas de trabajo humano.

Además, la producción intensiva de alimentos solía generar un rendimiento energético inferior al de sus predecesores menos intensivos. No es sorprendente que los agricultores tradicionales intentaran posponer el aumento de la carga de trabajo y el menor rendimiento relativo. En realidad, en general solo expandieron o intensificaron sus cultivos cuando tuvieron que satisfacer las necesidades básicas de poblaciones en crecimiento. A largo plazo, esta expansión e intensificación «forzada» dio sustento a poblaciones cada vez mayores, pero durante siglos e incluso milenios la disponibilidad de alimentos por persona y la calidad de la dieta casi no cambiaron.

La resistencia a la expansión y la intensificación queda claramente plasmada en la sorprendente persistencia de prácticas agrícolas poco intensivas en energía. La transición de la agricultura itinerante a la permanente requirió mucho tiempo. Cuando la producción local o regional no podía sostener el aumento progresivo de la población, solía preferirse ampliar la superficie cultivada en lugar de intensificar el cultivo. En consecuencia, la adopción del cultivo anual en lugar del barbecho extensivo y prolongado tardó siglos, e incluso milenios, en aparecer.

Existen muchos ejemplos históricos que ilustran cada gran cambio y la resistencia que generaron. El cultivo itinerante en entornos forestales solo permitía una subsistencia básica y escasas posesiones materiales, pero para muchas sociedades siguió siendo el modo de vida preferido incluso después de siglos de contacto con agricultores permanentes. Hasta bien entrado el siglo XX podían observarse fuertes contrastes entre los agricultores aluviales y los habitantes de las montañas en las provincias del sur de China, todo el sudeste asiático y muchas regiones de América Latina y África subsahariana. En Europa esta práctica también fue sorprendentemente persistente.

En Île-de-France, la región fértil en la que se halla París, el cultivo itinerante (con campos abandonados tras solo dos cosechas) seguía siendo común a principios del siglo XII (Duby, 1968). Y en los márgenes del continente, en el norte de Rusia y Finlandia, se siguió practicando durante el siglo XIX y en algunos lugares hasta el siglo XX (Darby, 1956; Tvengsberg, 1995) (figura 3.18). La oposición a la expansión de las tierras de cultivo es especialmente evidente en las tierras bajas, donde los campesinos se mostraban contrarios a la colonización de suelos de peor calidad en montañas o humedales cercanos. Los pueblos de la Europa carolingia estaban superpoblados y su suministro de grano fue insuficiente de manera crónica; aun así, excepto en algunas zonas de Alemania y Flandes, no solían crearse nuevos campos más allá de las tierras de cultivo más fácilmente cultivables (Duby, 1968). La historia europea posterior está repleta de

olas de migración alemanas desde regiones occidentales densamente pobladas. Armados con arados de vertedera mejorados, crearon nuevas tierras de cultivo en zonas consideradas poco deseables por los agricultores locales en Bohemia, Polonia, Rumanía y Rusia, y de paso prepararon el terreno para los conflictos nacionales de los siglos venideros.

Figura 3.18 Cultivo de tala y quema en la Europa de finales del siglo XIX. En esta fotografía, tomada por I. K. Inha en 1892 en Eno, Finlandia, un grupo de mujeres limpia la tierra antes de ararla y sembrar granos o raíces.

La expansión del cultivo requirió mano de obra adicional —para crear nuevas tierras de cultivo—, pero por lo general esta inversión energética puntual representó una fracción de los entrantes adicionales necesarios para el cultivo múltiple, el abono, el aterrazamiento, el riego, las zanjas o el levantamiento de campos en la agricultura intensiva. Así, incluso en regiones relativamente densamente pobladas de Asia y Europa, fueron necesarios milenios para pasar gradualmente del barbecho extensivo al cultivo anual y el multicultivo. En China, al principio de cada dinastía se adoptó una política de extensión de tierra cultivada como principal mecanismo para alimentar a la creciente población (Perdue, 1987). En Europa, a principios del siglo XVII el barbecho del 35-50% de la tierra todavía era habitual. Y en Inglaterra el sistema trienal más intensivo coexistió con el bienal a partir del siglo XII y solo logró prevalecer a partir del siglo XVIII (Titow, 1969).

No es sorprendente que la transición de la agricultura itinerante a la permanente y su posterior intensificación se produjeran generalmente en primer lugar en regiones con suelos pobres, tierra cultivable limitada, elevada aridez o precipitaciones desiguales. Aunque el estrés ambiental y la alta densidad de población no explican cada aspecto y cada paso del proceso de intensificación del cultivo, sí guardan con él una relación muy fuerte. Un excelente ejemplo antiguo proviene de los hallazgos arqueológicos en el noroeste de Europa. Existen claras evidencias de que, en las actuales Suiza y Reino Unido, la transición del Neolítico a la Edad del Bronce comenzó primero en áreas con tierra cultivable muy limitada (Howell, 1987).

La abundancia de tierra de cultivo disponible en la región de la cultura Seine-Oise-Marne (SOM) condujo a una mayor expansión del cultivo extensivo (en lugar de a su intensificación y consiguiente centralización). Las pruebas arqueológicas también muestran que en el Yucatán maya la intensificación comenzó antes en entornos marginales (más secos) y muy fértiles (y, por tanto, más densamente poblados) que en entornos normales (Harrison y Turner, 1978). En definitiva, el registro histórico es coherente: generalmente la intensificación se

produjo primero en entornos estresados (climas áridos y semiáridos o suelos pobres) y regiones densamente pobladas.

La provincia de Hunan, por ejemplo, que posee buenos suelos aluviales y precipitaciones abundantes, es hoy el mayor productor de arroz de China. A comienzos del siglo XV —más de un milenio después de que el valle del Wei (donde se encontraba Xi'an, antigua capital dinástica china), que era propenso a la erosión y la sequía, adoptara la agricultura intensiva—, era todavía una región de paso poco poblada. Y los agricultores de Flandes, que estaba densamente poblada, iban uno o dos siglos por delante de la mayoría de sus homólogos alemanes o franceses a la hora de recuperar humedales y fertilizar el suelo (Abel, 1962). Todo esto puede resumirse de la manera siguiente: como una preferencia fundamental de las sociedades agrícolas por minimizar la mano de obra dedicada al suministro de alimentos básicos y bienes esenciales. Dejando de lado por un momento las diferencias culturales, casi todos los agricultores tradicionales se comportaron como jugadores empedernidos. Trataron de mantenerse en los estrechos márgenes del excedente alimentario por demasiado tiempo, apostando a que el clima los ayudaría a producir otra cosecha correcta al año siguiente. Pero, dado el bajo rendimiento de los granos básicos y la ratio semilla/cosecha relativamente alta, perdieron repetidamente y a menudo de manera catastrófica.

Seavoy (1986) definió este comportamiento —adquirir niveles mínimos de seguridad alimentaria y bienestar material con la menor inversión posible de trabajo físico— como un compromiso de subsistencia. También consideraba que la elevada tasa de natalidad constituía la otra estrategia clave para reducir el trabajo per cápita. El coste energético del embarazo y la crianza de un hijo más es insignificante en comparación con su contribución al trabajo, que puede comenzar a una edad muy temprana. Según Seavoy (1986: 20): «Tener muchos hijos (4-6 de media) y ponerlos a trabajar tan pronto como sea posible es un comportamiento altamente racional en

sociedades agrícolas, donde la buena vida equivale a la mínima inversión de trabajo posible y no a la posesión de abundantes bienes».

Pero la insistencia de Seavoy en una preferencia agrícola universal por la indolencia como valor social fundamental es inaceptable. De manera similar, Clark (1987), que aparentemente no estaba al corriente de la hipótesis de Seavoy, intentó explicar la diferencia sustancial entre la productividad agrícola de principios del siglo XIX en Estados Unidos y Reino Unido, por un lado, y Europa Central y Oriental, por otro, apoyándose casi únicamente en el argumento del ritmo de trabajo más elevado en las naciones de habla inglesa. Este tipo de generalización basta ignora la influencia de muchos otros factores críticos. Las condiciones ambientales —la calidad del suelo, la cantidad y fiabilidad de las precipitaciones, la disponibilidad de tierra, fertilizante y alimento per cápita, la disponibilidad de animales de tiro — siempre han marcado una gran diferencia. Así como las particularidades socioeconómicas —régimen de propiedad, corvea, impuestos, alquileres, propiedad de los animales y acceso al capital— y la innovación técnica —mejores métodos agronómicos, razas de animales, arados e implementos de cultivo y cosecha—.

Komlos (1988) tuvo en cuenta algunos de estos factores en su convincente refutación de las exageraciones de Clark. Sin duda, muchas culturas dieron poco valor social al trabajo físico que requería el cultivo, y la cantidad de trabajo agrícola en las sociedades agrícolas tradicionales fue muy variable. Pero todo ello tuvo que ver con una compleja combinación de factores sociales y ambientales y no con una distinción simplista entre, por un lado, indolentes agricultores de subsistencia desprovistos de toda ambición por acumular riqueza material y, por otro, agricultores hipertrabajadores motivados por la acumulación de bienes.

Una generalización mucho menos polémica respecto al trabajo físico agrícola es que se repartió o delegó lo máximo posible. En la práctica, esto significa que buena parte del mismo corrió a cargo de mujeres y niños, generalmente personas con menos poder o sin poder

en las sociedades tradicionales. Las mujeres casi siempre fueron las que asumieron la mayoría de tareas del campo y domésticas. Y como incluso el embarazo y la lactancia no suponían una gran carga alimentaria adicional, y debido a que los niños solían empezar a trabajar a los 4-5 años de edad, las familias grandes eran el modelo menos intensivo en energía para conseguir minimizar el trabajo de los adultos y disponer de comida durante la vejez, cuando surgen más enfermedades.

En las sociedades tradicionales que utilizaban sobre todo trabajo humano, lo racional era minimizar la carga de trabajo individual creando familias numerosas. Al mismo tiempo, esta estrategia dificultó en extremo el aumento de la disponibilidad de alimento per cápita y la prevención de hambrunas recurrentes. Las sociedades en las que muchas —o casi todas— las tareas pesadas recaían en animales de tiro desvincularon en buena medida el trabajo humano de la productividad de los cultivos, pero solo lograron funcionar reservando un porcentaje significativo de tierra (y de la cosecha) a la alimentación de los animales.

Solo la energía fósil —directamente como combustible y electricidad e indirectamente en forma de productos químicos y maquinaria agrícola— logró sostener mayores densidades de población y proveer más alimento per cápita al mismo tiempo. La agricultura híbrida —con los primeros entrantes (indirectos) de energía fósil— surgió primero en Reino Unido y luego en Europa occidental y Estados Unidos con la adopción de herramientas de hierro y acero y maquinaria fabricada a partir de metal fundido (por primera vez en 1709 en Inglaterra) utilizando coque en lugar de carbón. Con todo, hacia 1850 la energía agrícola en Occidente seguía siendo fundamentalmente solar, y, aunque durante la segunda mitad del siglo XIX se generalizaron los dispositivos y máquinas de metal, el subsidio fósil solo empezó a suponer una diferencia importante después de 1910, mediante la difusión de tractores, camiones y

fertilizantes nitrogenados sintéticos, avances que analizo en el capítulo 5.

4

MOTORES PRIMARIOS Y COMBUSTIBLES PREINDUSTRIALES

En las sociedades preindustriales, la mayor parte de la población tuvo que dedicarse a la agricultura y aplicar modelos de trabajo que permanecieron básicamente inalterados durante milenios. Con todo, el exiguo e inconstante excedente alimentario que estas sociedades lograron producir con ayuda de unas pocas herramientas rudimentarias, animales de tiro y el trabajo de sus propios músculos bastó para favorecer la creciente complejidad de las sociedades urbanas. Concretamente, este proceso se tradujo en la construcción de edificios maravillosos (desde las pirámides del antiguo Egipto hasta las iglesias barrocas de principios de la era moderna), el crecimiento constante del alcance y la capacidad de los medios de transporte (desde los primeros medios de transporte terrestre con ruedas hasta el diseño de embarcaciones cada vez más rápidas y capaces de dar la vuelta al mundo) y la mejora progresiva de una infinidad de técnicas de fabricación, encabezadas por la metalurgia.

Los motores primarios y los combustibles que impulsaron estos cambios permanecieron inalterados durante milenios, pero el ingenio humano mejoró su rendimiento de muchas y notables maneras. Con el tiempo, algunas conversiones energéticas se volvieron tan poderosas y

eficientes que hicieron posible el inicio de la industrialización. La mejora del rendimiento y la eficiencia siguió dos estrategias. La primera fue el uso de un número cada vez mayor de pequeñas fuentes de energía, principalmente animales de tiro, prueba de una creciente capacidad de organización social. La segunda fue la innovación técnica, que introdujo nuevas formas de conversión de energía y aumentó la eficiencia de los procesos establecidos. En la práctica los dos enfoques se complementaron. La construcción de monumentos, por ejemplo, exigía tanto movilizar grandes cantidades de mano de obra como utilizar dispositivos de mejora de la productividad de manera extensiva: palancas, planos inclinados, poleas, grúas, aparejos diferenciales (*windlasses*) y ruedas de andar (*treadwheels*).

La diferencia entre los primeros convertidores de energía mecánica conocidos y sus sucesores utilizados durante la era industrial suele ser realmente notable. Las primeras trompas de agua —las primeras máquinas que utilizaron la energía de los saltos de agua— ni siquiera implicaban un movimiento rotatorio continuo, sino que eran meras palancas accionadas repetidamente (figura 4.1). Más tarde, las ruedas hidráulicas verticales permitieron introducir martinetes en las fraguas asiáticas y europeas, mientras que algunos martillos de fragua accionados por agua del siglo XIX fueron máquinas verdaderamente complejas, impresionantes y de muy alto rendimiento (figura 4.1).

Algo parecido podría decirse de cualquier motor primario o máquina accionado por agua y viento. Existe una diferencia abismal entre una rueda hidráulica horizontal de madera de la Edad Media, con una potencia de solo cientos de vatios (menos de medio caballo de fuerza), una rueda hidráulica vertical del siglo XVII, mucho mejor construida y diez veces más potente, y la rueda de Laxey, la rueda hidráulica de hierro más grande de Inglaterra, capaz de producir más de 400 kW (casi 600 caballos de fuerza). Lo mismo ocurre entre un ineficiente y pesado molino de viento medieval, que tenía que ser continuamente reorientado hacia el viento y tenía pérdidas de potencia de más del 80% debido a la sencillez de los engranajes y las velas, y un

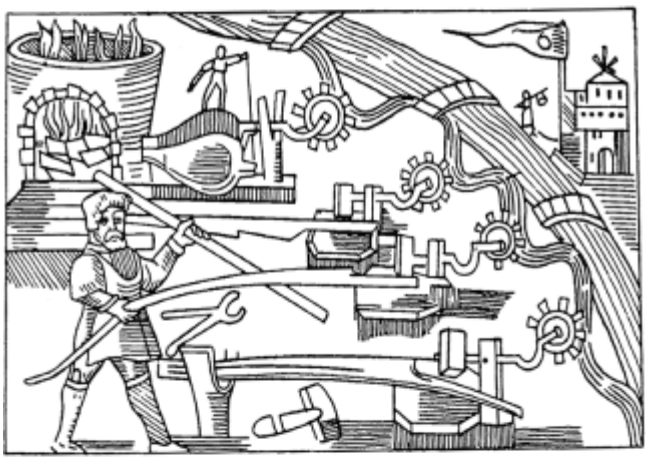
molino de viento estadounidense del siglo XIX, regulado automáticamente mediante velas de resorte (*spring sails*) y transmisiones lisas (*smooth transmissions*) y cuyo uso —generalmente el bombeo de agua— contribuyó de manera decisiva a viabilizar la agricultura en las Grandes Llanuras.

El contraste es igual de impresionante en el caso de las conversiones animadas y la combustión de fitomasa. Un caballo de tiro pesado del siglo XIX con herraduras de hierro y collera, enganchado a un carro ligero de techo plano en un camino de suelo duro, podía tirar de una carga veinte veces más pesada que sus antepasados, mucho menos masivos, sin herraduras, enganchados mediante pecheras a pesados carros de madera y caminando sobre suelos embarrados. Y un alto horno de hierro del siglo XVIII consumía menos de una décima parte de carbón por unidad de metal caliente producido de lo que necesitaba su predecesor medieval (Smil, 2016).

La capacidad humana para realizar tareas pesadas, en cambio, permaneció estable entre la Antigüedad y el comienzo de la industrialización. Incluso en las sociedades en las que el peso corporal medio aumentó con el tiempo, este aumento solo tuvo un efecto marginal en la capacidad máxima de esfuerzo muscular, y los esfuerzos más pesados siempre requirieron la fuerza combinada de muchas personas.

Para desplazar 269 m hacia el este un obelisco egipcio de 327 t desde el lugar donde lo dejaron los romanos (Calígula lo hizo colocar en la *spina* central de su circo, hoy al sur de San Pietro, en Roma), Domenico Fontana utilizó enormes palancas y poleas de madera (de hasta 15 m de largo) para levantarlo de su antigua base, y el 10 de septiembre de 1586, día en que lo colocó en el centro de la plaza de San Pedro, necesitó 900 hombres y 75 caballos para tirar de cuerdas guiadas por poleas y colocarlo sobre una nueva base (Fontana, 1590; Hemphill, 1990). El proyecto duró 13 meses y el levantamiento final, un día. Los traslados posteriores de obeliscos más famosos son los de las estructuras que ahora se encuentran en la plaza de la Concordia,

en París (1833), el terraplén del Támesis, en Londres (1878) y, desde 1881, Central Park, en Nueva York (Petroski, 2011).



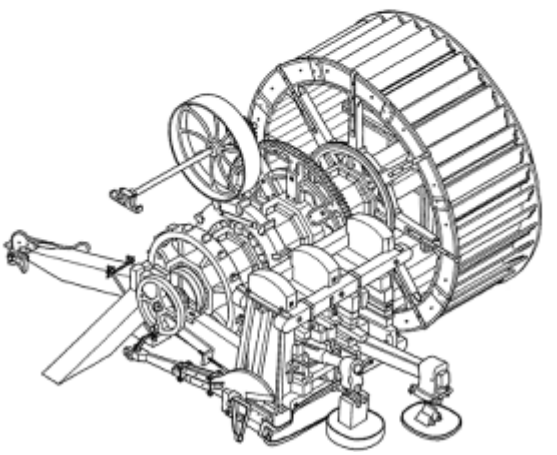


Figura 4.1 Estos tres martillos utilizan la fuerza del agua, pero su complejidad y rendimiento son muy diferentes. La trompa de agua de principios del siglo XIV era

una simple palanca accionada por el agua que caía (arriba). El martillo de forja europeo de finales del siglo XVI se accionaba mediante una rueda hidráulica cuya fuerza de rotación se transfería mediante varillas de conexión (centro). El martinete de fundición del siglo XIX era una máquina ajustable de alto rendimiento (abajo). Fuentes: Needham (1965) y Reynolds (1970).

Cuando la columna más pesada del mundo —604 t de granito rojo finlandés— se erigió en 1832 en San Petersburgo para conmemorar la victoria rusa sobre el ejército napoleónico, el arquitecto francés Auguste de Montferrand utilizó 2.400 hombres (1.700 dedicados al levantamiento propiamente dicho) durante menos de dos horas (recuadro 4.1). Los dos principales dispositivos que proporcionaron la fuerza mecánica necesaria para estos dos levantamientos y permiten a los hombres ejecutar desplazamientos y levantamientos prodigiosos han estado con nosotros no solo desde la época de los antiguos imperios, sino, necesariamente, desde mucho antes —de lo contrario, ¿de qué manera se levantaron las 40 t de piedra de Stonehenge?—.

En este capítulo presento primero las cualidades y limitaciones de los motores primarios tradicionales —músculos humanos y animales, viento y agua— y la quema de combustibles de fitomasa —principalmente madera y carbón vegetal, aunque en regiones deforestadas también se utilizaron muchos residuos de cultivo, como paja de cereales, y en pastizales, estiércol seco—. Después, analizo con cierto detalle el uso de estos motores primarios y combustibles en segmentos críticos de la economía tradicional: la preparación de alimentos, la producción de luz y calor, el transporte terrestre y marítimo, la construcción y la metalurgia ferrosa y no ferrosa.

MOTORES PRIMARIOS

Antes de la difusión de las máquinas de vapor, los únicos motores primarios utilizados en las sociedades tradicionales fueron el trabajo humano y animal y la conversión de la energía cinética del agua y el viento por medio de velas y molinos. Aunque el posterior retroceso de

todos estos motores primarios fuera relativamente rápido, las ruedas hidráulicas y los molinos de viento siguieron siendo muy importantes o incluso más que antes durante la primera mitad del siglo XIX, los barcos de vela fueron utilizados como medio de transporte marítimo hasta 1880 y los animales de tiro dominaron la agricultura —incluso la agricultura occidental más avanzada— hasta después de la Primera Guerra Mundial.

En realidad, las primeras etapas de la industrialización hicieron aumentar la demanda de mano de obra, que podía abarcar desde esfuerzos extremadamente pesados en la minería de carbón y la industria siderúrgica, hasta una infinidad de agotadoras tareas relacionadas con la manufactura, siendo el trabajo infantil habitual en los países occidentales incluso a principios del siglo XX: en 1900, el 26% de niños de entre 10 y 15 años trabajaba; en el sector primario, este porcentaje era del 75% en el caso de las niñas (Whaples, 2005).

RECUADRO 4.1

El levantamiento de la columna de Alejandro

La gran pieza de granito rojo que se convirtió en la columna de Alejandro se extrajo en Virolahti, Finlandia, se llevó en una barcaza construida especialmente para ella y capaz de transportar 1.100 t (la columna casi cayó al agua durante la carga), recorrió 190 km por mar hasta el terraplén del Neva en San Petersburgo, y fue descargada en una cubierta de madera maciza, elevada 10,5 m gracias a un plano inclinado y colocada en una plataforma que formaba un ángulo recto con el pedestal del centro de la plaza del Palacio. Sobre el pedestal se había erigido un sólido andamio de madera de 47 m de altura, con poleas colgando de cinco vigas dobles de roble. Montferrand construyó una maqueta a escala 1/12 del andamiaje para guiar a los carpinteros durante su construcción (Luknatskii, 1936). Para el levantamiento se utilizaron 60 cabrestantes montados en el andamiaje en dos filas escalonadas. Los trinquetes eran tambores de hierro montados en un marco de madera, los bloques superiores colgaban de las vigas dobles de roble y había 522 cuerdas —cada una de ellas preparada para levantar 75 kg (el triple de la

carga real)— fijadas al eje de la columna. La masa total del monolito, contando todos los dispositivos, era de 757 t.

El levantamiento tuvo lugar el 30 de agosto de 1832 y empleó de manera directa a 1.700 soldados y 75 oficiales, supervisados por capataces que controlaban la velocidad y el ritmo de trabajo en función de la tensión de la cuerda. Los ayudantes de Montferrand se situaron en las cuatro esquinas del andamiaje con 100 marineros que vigilaban los bloques y las cuerdas y los mantenían rectos; 60 obreros se situaban en el propio andamio; y los carpinteros, canteros y demás artesanos se mantenían en reserva. La mano de obra total implicada en la instalación fue de unas 2.400 personas y la tarea se completó en solo 105 minutos. Sorprendentemente, la columna se ha mantenido en posición vertical sin estar sujeta al pedestal: la masa, de 25,45 m de altura y ligeramente cónica (3,6 m de diámetro en la parte inferior y 3,15 m en la superior) simplemente descansa sobre sus cimientos.

Aún hoy, el esfuerzo físico agotador y el trabajo infantil siguen siendo comunes en muchas regiones rurales del África subsahariana y las regiones más pobres de Asia: en África, las mujeres llevan pesadas cargas de leña en la cabeza, mientras que en India rompen piedras con ayuda de pequeños martillos; en India, Pakistán y Bangladesh, los hombres desmantelan enormes barcos en playas calurosísimas (Rousmaniere y Raj, 2007); en China, los campesinos extraen carbón en pequeñas minas rurales. Y millones de personas siguen estando sometidas a diferentes formas de trabajo forzado y esclavo y a la trata de seres humanos (Organización Internacional del Trabajo, 2015). La dependencia de la mano de obra humana (incluidas sus formas más humillantes) es una de las marcas más evidentes de la gran división que existe entre el mundo desarrollado y el pobre. Incluso en Occidente, el esfuerzo físico intenso (en la minería subterránea de carbón, la siderurgia, la silvicultura o la pesca) fue frecuente hasta la década de 1960. En realidad, el uso de la mano de obra humana y animal es más que una cuestión de interés histórico: es el principal fundamento (no muy distante en el tiempo) de nuestra actual riqueza.

El relato sobre los motores primarios preindustriales sería incompleto si no mencionara la invención, difusión e importancia histórica de la pólvora. Todas las culturas antiguas admiraban y temían el poder de los truenos y relámpagos. El anhelo por emular su poder destructivo aparece en muchas narraciones y leyendas (Lindsay, 1975). Durante miles de años, la única pálida imitación que existió consistió en fijar un material incendiario en la punta de las flechas, o lanzarlo en contenedores desde catapultas. Estas mezclas incendiarias utilizaban azufre, petróleo, asfalto y cal viva. La invención de la pólvora permitió combinar la fuerza propulsora con un gran poder explosivo e inflamatorio.

Fuerza humana y animal

Hasta mediados del siglo XX, la energía humana y animal fue el motor primario más importante del mundo. Su capacidad, que siempre estuvo limitada por el requerimiento metabólico y las propiedades mecánicas de los cuerpos humano y animal, restringió el desarrollo de las civilizaciones preindustriales. Las sociedades cuya energía cinética provenía casi exclusivamente de este medio (como la antigua Mesopotamia o Egipto, donde los barcos de vela eran la única excepción) o en buena medida de este medio (Europa en la Edad Media o la China rural hasta hace solo dos generaciones, donde la energía del agua y el viento estaba limitada a ciertos usos específicos, son excelentes ejemplos de ello), no podían proporcionar un suministro fiable de alimentos y riqueza material suficiente a la mayoría de sus habitantes.

Solo había dos formas prácticas de aumentar la producción de energía útil humana y animal: concentrando *inputs* individuales o utilizando dispositivos mecánicos para redirigir y amplificar el esfuerzo muscular. El primer enfoque —especialmente el uso directo de los músculos humanos— en seguida topa con limitaciones prácticas. Incluso una fuerza de trabajo infinita sirve de poco para coger y desplazar un objeto relativamente pequeño pero muy pesado,

ya que solo un número limitado de personas puede colocarse a su alrededor. Y si bien un grupo de personas puede cargar un objeto pesado, levantarlo primero para insertar cabestrillos o postes puede ser un problema difícil. La capacidad humana para levantar y desplazar una carga se limita a un peso sustancialmente más pequeño que su propia masa corporal. Las sillas de sedán tradicionales (camillas), utilizadas por muchas sociedades del Viejo Mundo, eran transportadas por dos hombres, cada uno soportando 25-40 kg, con cargas más pesadas soportadas por postes apoyados en sus hombros.

Al cargar y descargar barcos y carros, los *saccarii* romanos (porteadores) levantaban y transportaban sacos de 28 kg en distancias cortas (Utley, 1925). Una carga más pesada solo era asumible con la ayuda de dispositivos rudimentarios que conferían una ventaja mecánica significativa (generalmente permitían desplegar menos fuerza durante una distancia más larga). Durante la Antigüedad se utilizaron ampliamente cinco dispositivos. Filón de Bizancio los enumeró en el siglo III a. C.: el torno (*wheel and axle*), la palanca, el sistema de poleas, la cuña o plano inclinado y el tornillo sin fin. Sus formas y combinaciones más comunes iban desde los tornillos hasta las ruedas de andar. Utilizando estas herramientas y máquinas rudimentarias pudo ampliarse el alcance de la acción humana (recuadro 4.2). Las tres herramientas más sencillas —palancas, planos inclinados y poleas — fueron utilizadas por casi todas las civilizaciones antiguas (Lacey, 1935; Usher, 1954; Needham, 1965; Burstall, 1968; Cotterell y Kamminga, 1990; Wei, 2012).

Las palancas son piezas rígidas y delgadas de madera o metal. Al girar alrededor de un fulcro, transmiten una ventaja mecánica que corresponde al cociente de las longitudes de los brazos de esfuerzo y carga (cuanto más alto sea el cociente, más fácil y rápida será la tarea). El uso de las palancas en la Antigüedad abarcó desde la conducción de barcos de remo hasta el desplazamiento de cargas pesadas (figura 4.2). Las palancas se clasifican según el punto de pivote (figura 4.2). Un primer tipo de palanca es aquel cuyo pivote se

sitúa entre la carga y la fuerza aplicada, que actúa en la dirección opuesta a la carga desplazada. En un segundo tipo de palanca el pivote está situado en un extremo y la fuerza actúa en la dirección de la carga. Por último, existe un tercer tipo de palanca que no proporciona ninguna ventaja mecánica, sino que aumenta la velocidad de la carga, como ocurre con las catapultas, los azadones y las guadañas.

Las palancas de mano comunes del primer tipo son las patas de cabra, las tijeras y los alicates (doble palanca). Las palancas más utilizadas del segundo tipo son las carretillas (Needham, 1965; Lewis, 1994). Las carretillas chinas, utilizadas desde la dinastía Han, solían tener una gran rueda central (90 cm de diámetro) rodeada de un marco de madera. Al situar la carga justo encima del eje, podían transportar mucho peso (generalmente 150 kg); los campesinos las utilizaban para llevar productos al mercado y transportar personas sentadas de cada lado (Hommel, 1937). Para facilitar la propulsión podían utilizarse pequeñas velas. Las primeras carretillas europeas de las que tenemos pruebas convincentes son de la Alta Edad Media (finales del siglo XII y principios del siglo XIII). Posteriormente se utilizaron sobre todo en Inglaterra y Francia, usualmente en la construcción y la minería. Su fulcro estaba situado al final, lo que procuraba más presión sobre la gente que las empujaba, pero aun así ofrecían una considerable ventaja mecánica (típicamente x3).

RECUADRO 4.2

Trabajo, fuerza y distancia

El trabajo tiene lugar cuando una fuerza —provenga de un motor primario animado o inanimado— cambia el estado de movimiento de un cuerpo. Su magnitud es igual al producto de la fuerza ejercida y el desplazamiento en la dirección en la que la fuerza actúa. En términos formales, una fuerza de un newton y un desplazamiento de un metro requieren un julio de energía (J = Nm). Para entender los órdenes de magnitud más relevantes: coger un libro de

1 kg de un escritorio (situado a 0,7 m del suelo) y colocarlo en una estantería (a 1,6 m del suelo) requiere un trabajo de casi 9 J. Elevar una piedra de tamaño medio de la pirámide de Khufu (2,5 t) un nivel más arriba (75 cm) requiere 18.000 J (18 kJ), dos mil veces más energía que colocar el libro en la estantería.

Naturalmente, se obtiene la misma cantidad de trabajo aplicando una fuerza más grande a lo largo de una distancia menor o una fuerza más pequeña a lo largo de una distancia mayor. Cualquier dispositivo que convierta una fuerza de entrada en una fuerza de salida más elevada proporciona una ventaja mecánica cuya magnitud se mide como la mera relación entre ambas fuerzas.

El torno forma una palanca circular, siendo el brazo largo la distancia entre el eje y el borde exterior de la rueda y el brazo corto el radio del eje, lo que produce una gran ventaja mecánica, incluso en ruedas pesadas sobre superficie rugosa. Los primeros tornos (utilizados en Mesopotamia antes del 3000 a. C.) utilizaban ruedas de madera maciza. 1.000 años más tarde se inventaron las ruedas de radios, utilizadas primero en carros, y las llantas de hierro, que redujeron la fricción. La importancia de la rueda en el Viejo Mundo es enorme, como demuestra la rápida difusión de la invención de vehículos con ruedas y sus innumerables usos mecánicos desde entonces. Curiosamente, en las Américas no se utilizaron ruedas. Y en el mundo árabe, en muchas regiones desérticas los camellos de carga fueron más importantes que el transporte con ruedas tirado por bueyes (Bulliet, 1975, 2016).

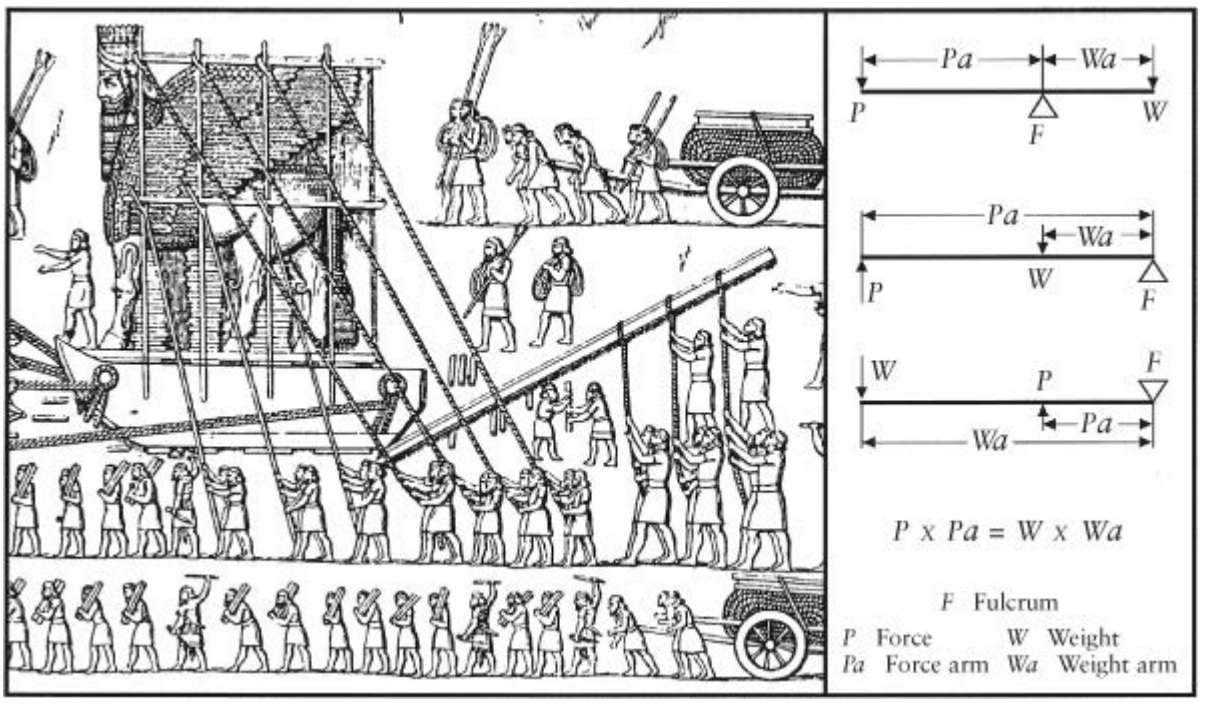


Figura 4.2 Se distinguen tres tipos de palanca en función del punto de aplicación de la fuerza en relación con el objeto (cuyo peso, W, actúa siempre en dirección descendente) y el fulcro (F). En un primer tipo de palanca, la fuerza opera en la dirección opuesta a la fuerza del objeto. En un segundo tipo, la fuerza opera en la dirección del objeto. Ambos tipos de palanca confieren la misma ventaja mecánica: un incremento de la fuerza a expensas de la distancia. En el tercer y último tipo de palanca, la fuerza se mueve en una distancia menor que la del objeto, lo que da como resultado un incremento de velocidad. Los dos primeros tipos de palanca han tenido innumerables aplicaciones en la elevación y el desplazamiento de objetos y la construcción de máquinas. En la imagen, un detalle de un bajorrelieve asirio parcialmente reconstruido en Nínive (700 a. C.) muestra una gran palanca utilizada para mover una estatua gigante de toro alado con cabeza de hombre. Fuente: Layard (1853).

Dejando de lado la fricción, la ventaja mecánica de un plano inclinado es igual al cociente entre la longitud de la pendiente y la altura a la que se eleva un objeto. Como la fricción puede reducir esta ventaja de manera sustancial, para el mejor rendimiento práctico se utilizaba una superficie lisa y algún tipo de lubricante (el agua era el más barato y más fácil de obtener). Según Heródoto, el principal medio de transporte de piedras pesadas desde la orilla del Nilo hasta

el emplazamiento de las grandes pirámides era un plano inclinado. También se ha especulado mucho sobre su uso en la construcción de las pirámides; más adelante explico por qué debemos descartar esta opción. El uso moderno más habitual de los planos inclinados son las rampas: desde poderosas placas de metal para la carga en vehículos y barcos, hasta superficies de plástico blando para evacuar a los pasajeros de un avión en caso de emergencia.

Las cuñas son simples planos de doble inclinación. Ejercen grandes fuerzas laterales en distancias muy pequeñas. Se han utilizado mucho para partir rocas, por medio de trozos de madera insertados en grietas de la piedra y humedecidos, y como bordes cortantes en hachas y azuelas. Los tornillos, usados por primera vez en las prensas de uva y aceituna de la antigua Grecia, no son más que planos circulares inclinados situados alrededor de un cilindro central. Como ya hemos dicho anteriormente, los tornillos también se utilizaron para elevar agua poco profunda. Su gran ventaja mecánica permite que los trabajadores ejerzan mucha presión haciendo muy poco esfuerzo. En la actualidad, los tornillos pequeños (producidos en masa y tensados mediante una rotación en el sentido de las agujas del reloj) se han transformado en piezas sujetadoras de un solo uso muy habituales.

La polea —una rueda acanalada que guía una cuerda o un cable—, inventada en el siglo VIII a. C., redirige la fuerza de una carga y, por tanto, facilita su manipulación. Sin embargo, no confiere ninguna ventaja mecánica, y su uso puede provocar una caída accidental de la carga. El trinquete se inventó para resolver el segundo problema y las poleas compuestas resolvieron la primera deficiencia, ya que la fuerza necesaria para levantar un objeto es casi inversamente proporcional al número de poleas utilizadas (figura 4.3). La *Mecánica*, atribuida a Aristóteles pero no escrita por él (Winter, 2007), demuestra una clara comprensión de la ventaja mecánica que ofrecen estos dispositivos.

Los antiguos chinos utilizaban poleas con tanta frecuencia que ni siquiera las actividades de entretenimiento de palacio podían prescindir de ellas. Una vez, todo un *corps de ballet* de 220 niñas en

barcas fue arrastrado fuera de la corriente de un lago utilizando poleas (Needham, 1965). Con todo, la prueba antigua más famosa de la eficacia de las poleas compuestas es la demostración que realizó Arquímedes ante el tirano de Siracusa Hierón II, registrada en las *Vidas paralelas* de Plutarco. Cuando Arquímedes declaró «Dadme un punto de apoyo y moveré el mundo», Hierón le pidió una demostración a la altura de tales poderes.

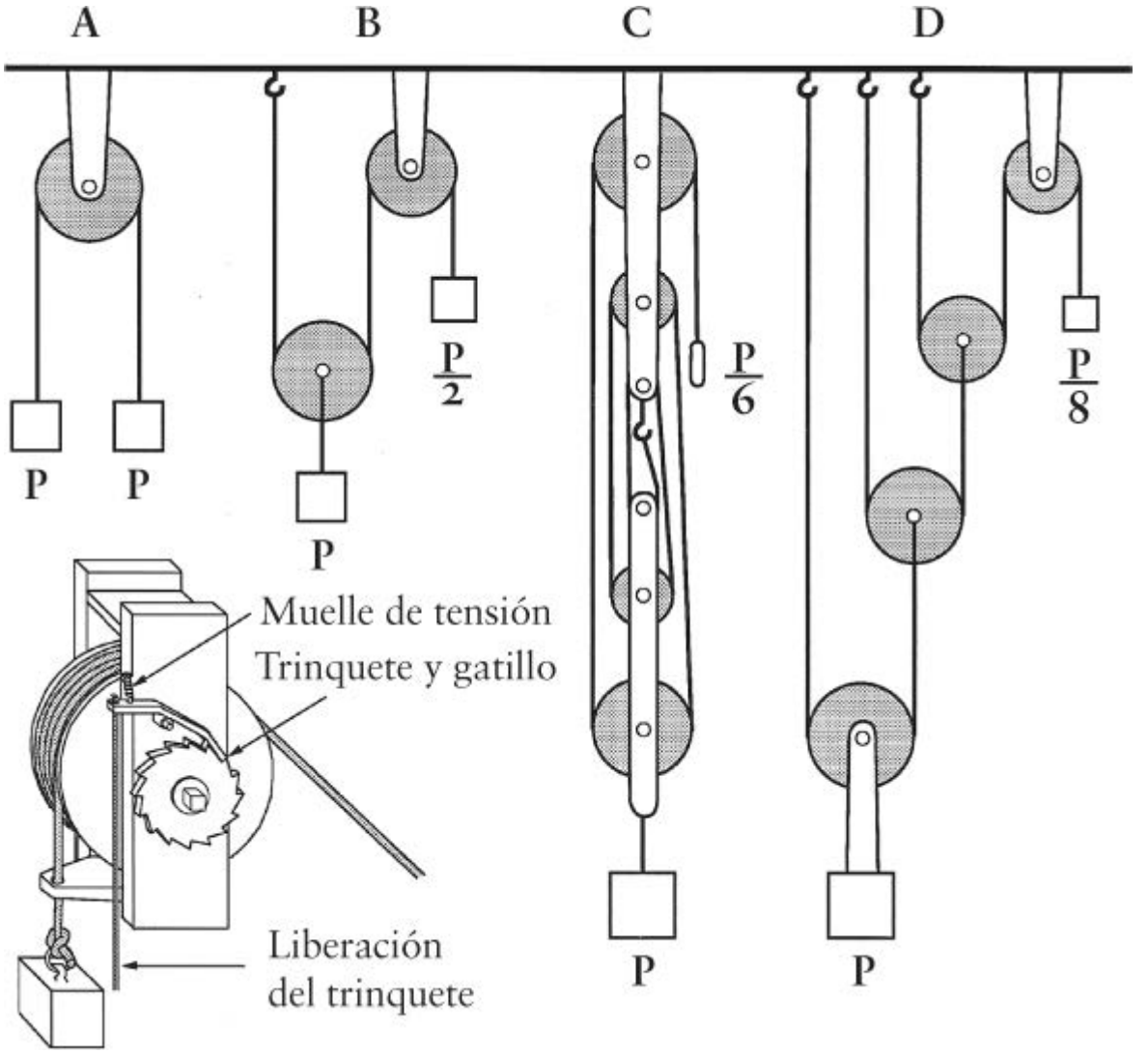


Figura 4.3 Las fuerzas de equilibrio en las poleas vienen determinadas por el número de cuerdas de suspensión. No hay ninguna ventaja mecánica en A. En B, el peso P está suspendido por dos cuerdas paralelas y, por tanto, el extremo libre solo necesita una carga de P/2 para estar en equilibrio (en C de P/6, y así sucesivamente). Un trabajador equipado con una polea de Arquímedes (D) puede levantar (sin tener en cuenta la fricción) una piedra de 200 kg con una fuerza de solo 25 kg, aunque una elevación de 10 m requeriría utilizar 80 m de cuerda de contrapeso. Puede utilizarse un trinquete para interrumpir este esfuerzo en cualquier momento.

Arquímedes se fijó entonces en un mercante de tres mástiles de la flota real, que había sido arrastrado a la orilla gracias al trabajo de muchos hombres, y después de subir a bordo muchos pasajeros y la carga habitual, se sentó a mucha distancia del barco y, sin

> grandes aspavientos, activó tranquilamente con su mano un sistema de poleas compuestas y lo atrajo hacia sí suave y uniformemente, como si se deslizara por el agua. (Plutarco, 1961)

A la hora de aplicar la fuerza humana de manera continua —necesaria para levantar, moler, aplastar y golpear—, resultaron críticos tres tipos de dispositivos mecánicos: molinetes (*windlasses*) y cabrestantes (*capstans*), ruedas de andar (*treadwheels*) y ruedas dentadas (Ramelli, 1976 [1588]). Los molinetes se utilizaban comúnmente no solo para elevar agua de los pozos y materiales de construcción con grúas, sino también para tensar el mecanismo de las grandes catapultas utilizadas en el asedio de ciudades y fortalezas, las armas estacionarias más destructivas de la Antigüedad (Soedel y Foley, 1979). Los molinetes horizontales —que requerían desplazar cuatro veces la empuñadura por revolución (figura 4.4, izquierda)— y verticales (figura 4.5) permitían la transmisión de energía por medio de cuerdas o cadenas mediante un simple movimiento giratorio. Las manivelas, utilizadas por primera vez en China durante el siglo II d. C. e introducidas en Europa siete siglos más tarde (figura 4.4, derecha), lo hicieron aún más fácil, aunque su velocidad de uso (o pedaleo) tenía que coincidir con la de una máquina accionada (a menudo un torno).

Esta limitación se superó utilizando una manivela para accionar una gran rueda de madera o hierro montada de manera independiente en un eje pesado y cuya rotación se transmitía a un torno mediante una correa cruzada. Esta mejora permitió el uso de muchas relaciones de transmisión (*gear ratios*), mientras que el impulso de una gran rueda ayudaba a mantener revoluciones uniformes a pesar que el esfuerzo muscular fuera irregular. Esta innovación medieval permitió un mecanizado riguroso de las piezas de madera y metal, utilizado para construir una amplia variedad de mecanismos de precisión —desde relojes hasta las primeras máquinas de vapor—. Sin embargo, no eliminó el duro trabajo necesario para cortar metales duros (figura 4.6). Los trabajadores de George Stephenson, por ejemplo, que

utilizaban una gran rueda para fabricar piezas para la primera locomotora de vapor, tenían que descansar cada cinco minutos (Burstall, 1968).

Figura 4.4 Mineros utilizando un molinete horizontal (izquierda) y una manivela (derecha) para subir el agua de un pozo. Una pesada rueda de madera, a veces con trozos de plomo sujetos a sus radios, ayudaba a conservar el impulso y facilitar la elevación. Fuente: *De re metallica*, de Agricola (1912 [1556]).

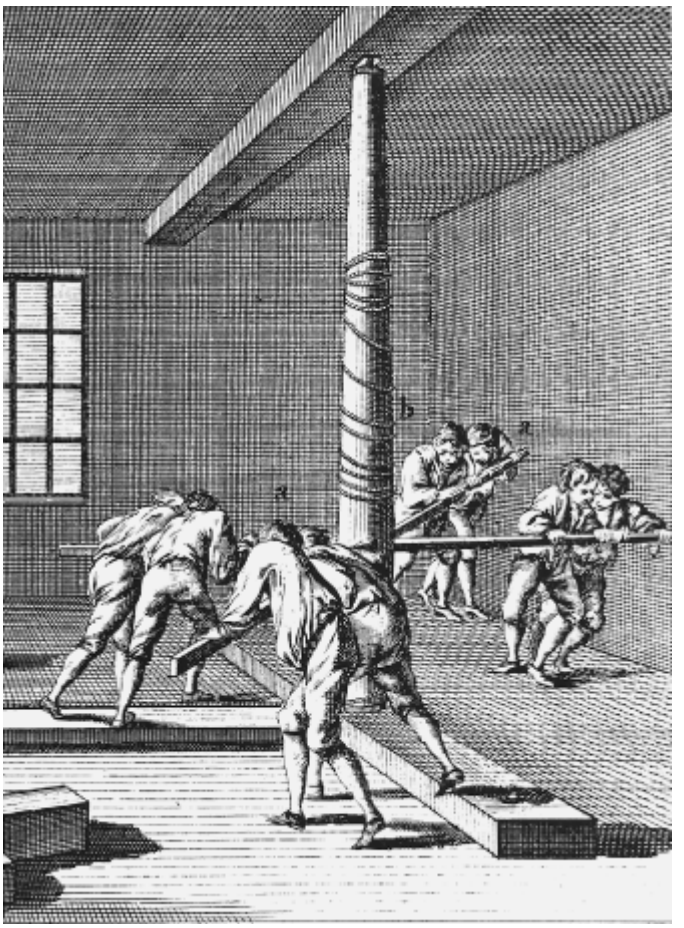


Figura 4.5 Ocho hombres hacen girar un gran cabrestante vertical en un taller francés de mediados del siglo XVIII. El cabrestante enrolla un cordón atado a unas pinzas, pasando un alambre de oro por un troquel. Fuente: *Enciclopedia* (Diderot y D'Alembert, 1769-1772).

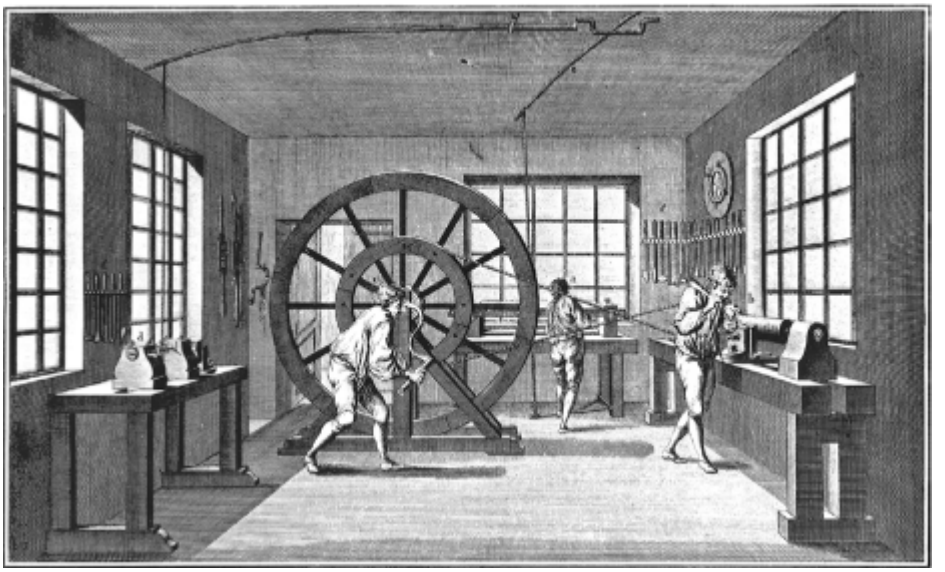


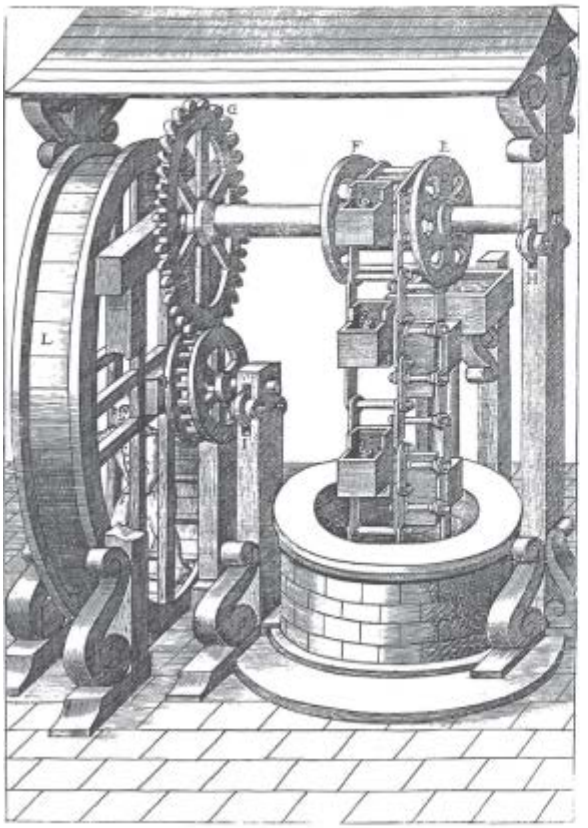
Figura 4.6 Una gran rueda accionada por una manivela, utilizada para girar un torno de metalistería. La rueda más pequeña se utilizaba para trabajar con diámetros más grandes, y viceversa. Al fondo, un hombre trabaja en un torno de pie mecanizando de madera. Fuente: *Enciclopedia* (Diderot y D'Alembert, 1769-1772).

El despliegue de los músculos más grandes de la espalda y las piernas en las ruedas de andar proporcionaba mucha más potencia útil que los tornos manuales. Las ruedas de mayor tamaño (también llamadas, extrañamente, grandes ruedas) estaban hechas de dos ruedas cuyas llantas, unidas por tablas, formaban un pavimento sobre el que caminaban los hombres. La primera imagen de una gran rueda de escalera interna (el *polyspaston* griego) se encuentra en el bajorrelieve de la tumba romana de los Haterii (100 d. C.). Las grúas de rueda (*treadwheels*) romanas podían levantar hasta 6 t. En Europa, su uso se generalizó durante la Edad Media y el comienzo de la era moderna en las principales obras de construcción, muelles y minas, donde también se utilizaban para bombear agua (figura 4.7).

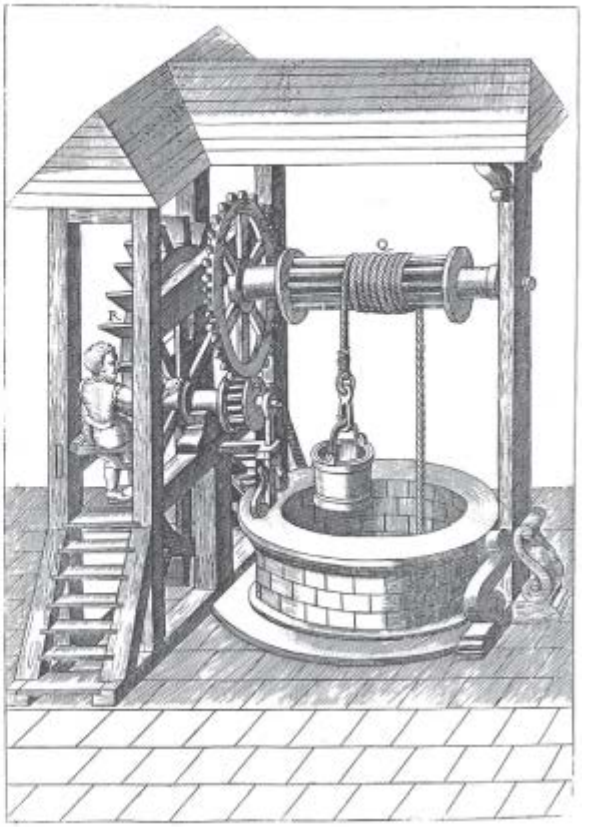
La diferencia entre el radio de la rueda y el del tambor del eje otorgaba a estas grúas (*treadwheels*) una gran ventaja mecánica. Podían elevar cargas tan pesadas como piedras angulares, maderas macizas o campanas hasta la cima de catedrales y otros edificios altos. En 1563, Pieter Brueghel el Viejo pintó una grúa de este tipo elevando

una gran piedra hasta el segundo nivel de su imaginaria Torre de Babel (Parrott, 1955; Klein, 1978). Su dispositivo, con ruedas de tracción (*treadwheels*) a ambos lados, exigía el trabajo de 6-8 hombres. Las ruedas verticales de tracción externa eran menos comunes, pero permitían el máximo par cuando se caminaba en el mismo nivel que el eje (figura 4.7). También existían grúas de rueda inclinadas (*inclined treadwheels*), con trabajadores apoyados en una barra (figura 4.7), y en las prisiones inglesas las cintas de correr (*treadmills*) se hicieron comunes a principios del siglo XIX (recuadro 4.3, figura 4.8).

(a)



(b)



(c)

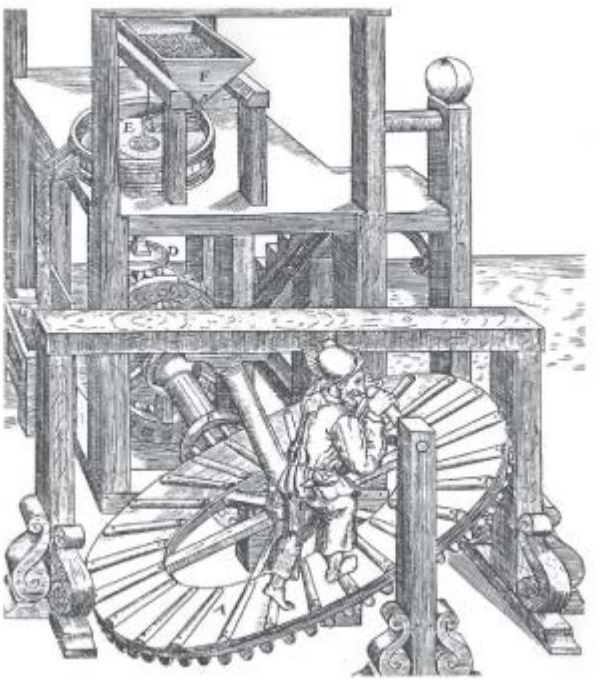


Figura 4.7 Detalles de ruedas de andar (*treadwheels*) con diferente par. a) Rueda interna. b) Rueda externa (par máximo). c) Rueda inclinada. Fuente: *De re metallica*, de Agricola (1912 [1556]).

Las ruedas de andar (*treadwheels*) podían diseñarse o adaptarse para los animales. Además, tenían la ventaja añadida de ser relativamente móviles: podían ir de un trabajo a otro rodando sobre una superficie plana o poco inclinada. Hasta la introducción de las grúas ferroviarias de vapor, eran la única forma práctica de gestionar cargas pesadas. Su máxima potencia estaba limitada por el tamaño y el diseño. Con un trabajador, la potencia podía alcanzar picos de 150-200 W durante breves periodos de tiempo, y no más de 50-80 W durante periodos más largos, debido al esfuerzo sostenido y el cansancio muscular. Las ruedas (*treadwheels*) más grandes, accionadas por ocho hombres, podían alcanzar picos de 1.500 W.

Las tareas que más esfuerzo requerían eran aquellas impulsadas por un solo trabajador usando manivelas, pedales o tornillos. Las máquinas utilizadas, accionadas a mano o a pie, iban desde pequeños tornos de madera e imprentas hasta máquinas de coser, cuyos primeros modelos comerciales aparecieron en la década de 1830 y cuyo uso se generalizó durante la década de 1850 (Godfrey, 1982). En esa misma época, en India, muchos niños y adultos utilizaban poleas para operar ventiladores de techo conocidos como *punkah*: era la única manera de que el monzón fuera un poco más soportable para aquellos que podían permitirse pagar un *punkah wallah*.

La cuestión de cuánto trabajo útil podía producir un hombre en un día quedó sin resolver durante mucho tiempo. El cálculo de equivalencia de esfuerzo entre hombres y caballos tampoco estaba claro: entre 2,5 y 14 hombres por caballo de fuerza (Ferguson, 1971). La definición de caballo de fuerza de Watt suponía una equivalencia de 7 trabajadores. La primera medición fiable fue la de Guillaume Amontons (1663-1705), que equiparó el trabajo de pulidores de vidrio durante un turno de 10 h con el levantamiento continuo de un peso de

25 libras a una velocidad de 3 pies/s (Amontons, 1699). En unidades científicas modernas, esto equivale a un trabajo útil total de 3,66 MJ a una tasa de 102 W.

¿Cuán potentes y eficientes somos las personas como motores primarios? La primera parte de la pregunta obtuvo una respuesta precisa mucho antes de que se sistematizara el estudio de la energía, en el siglo XIX. Ya hemos dicho que las primeras estimaciones indicaban que un caballo de fuerza equivalía al esfuerzo de 2,5-14 hombres, y que antes de 1800 los cálculos convergieron alrededor de 70-150 W. Cuando se trabaja a una tasa de 75 W, se necesitan 10 hombres para igualar la potencia de un caballo.

RECUADRO 4.3

Trabajo en una rueda de andar (*treadmill*)

Las ruedas de andar (*treading devices*) más grandes funcionaron durante el siglo XIX en las prisiones inglesas, donde William Cubitt (1785-861) las introdujo como medio de castigo, aunque pronto también se utilizaron para moler grano y bombear agua, o incluso simplemente para hacer ejercicio (Mayhew y Binney, 1862). Estas largas ruedas penales inclinadas (*inclined penal treadmills*) estaban compuestas de escalones de madera alrededor de un marco de hierro cilíndrico. Podían acomodar hasta 40 prisioneros de pie, agarrados a un pasamanos horizontal para mayor estabilidad y obligados a caminar al unísono. El uso penal de las ruedas de andar se prohibió en 1898.

En 1823 el gobernador de la prisión de Devon consideraba que «el trabajo en la rueda de andar (*Tread Mill*) no es perjudicial, sino propicio para la salud de los prisioneros» (Hippisley, 1823: 127). Los millones de entusiastas de la cinta de correr (*treadmill*) moderna podrían estar de acuerdo, y Landels (1980: 11-12), si bien señaló que no podemos hablar o incluso pensar en estas máquinas sin emoción, subrayó no obstante que una cinta de correr (*treadmill*) bien diseñada no solo era un dispositivo mecánico muy eficiente, sino también muy cómodo para el operador «en la medida en que cualquier trabajo físico continuo y monótono puede resultar cómodo».

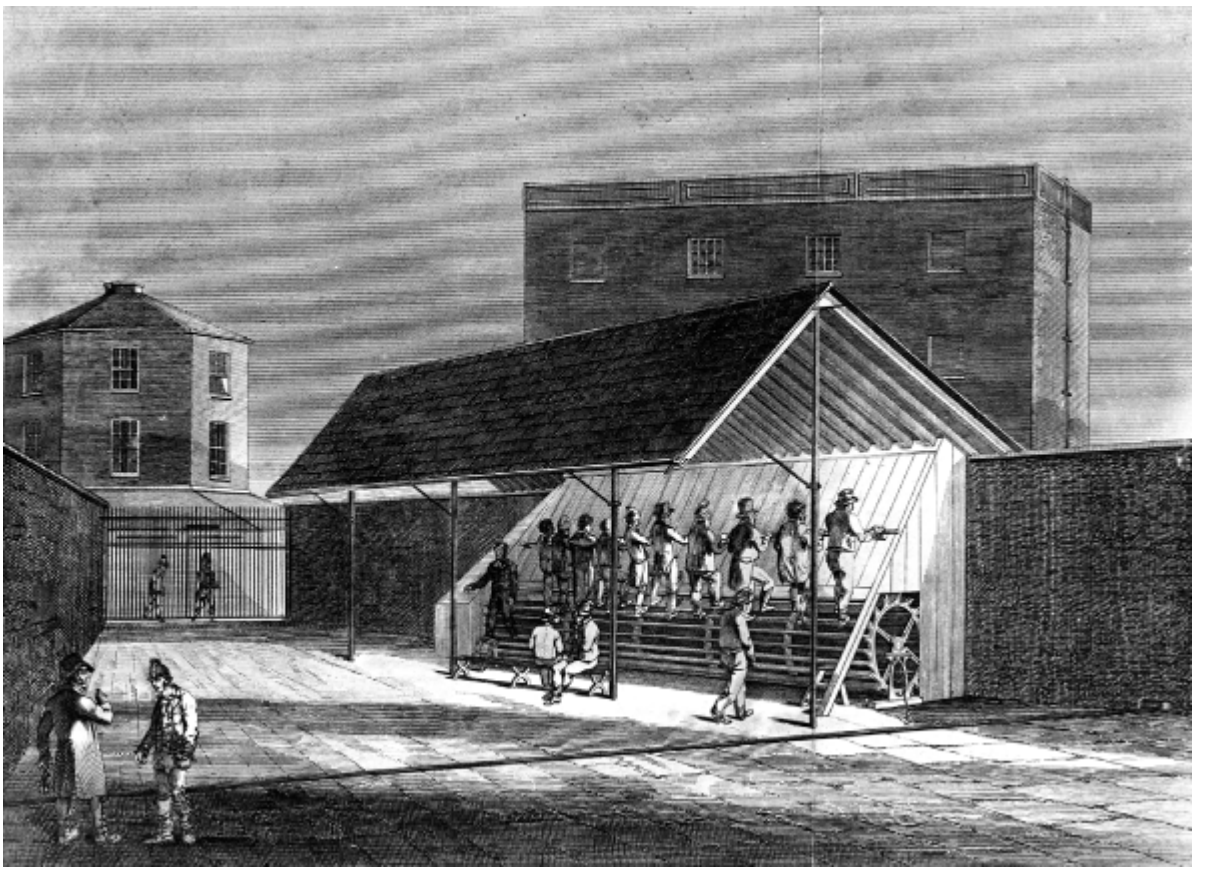


Figura 4.8 Prisioneros en una rueda de andar (*treadmill*) en la Casa de Corrección de Brixton (Corbis).

En 1798, Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806) analizó de manera más sistemática los diferentes usos de la fuerza de los hombres durante su trabajo diario (Coulomb, 1799): desde la ascensión de un pico situado a 2.923 m de altura en las Islas Canarias en poco menos de 8 h, hasta la labor de los madereros, que ascendían 12 m con cargas de 68 kg hasta 66 veces al día. El primer esfuerzo suponía un trabajo total de 2 MJ y una potencia de 75 W; el segundo, un trabajo de 1,1 MJ y una potencia de 120 W. Los cálculos posteriores confirmaron el rango de potencia establecido por Coulomb: la mayoría de hombres adultos puede sostener un trabajo útil a un ritmo de 75-120 W (Smil, 2008a). A principios del siglo XX, el estudio de la tasa metabólica basal (TMB) humana, encabezado por Francis G. Benedict (1870-1957), del Instituto Carnegie, en Boston, condujo a la

formulación de ecuaciones sobre gastos de energía esperados y el establecimiento de multiplicadores típicos de la TMB de acuerdo con diferentes niveles de actividad física (Harris y Benedict, 1919). Aún hoy, ambas son válidas para una amplia gama de tipos de cuerpos y edades (Frankenfield, Muth y Rowe, 1998).

Ya hemos señalado que comparar el esfuerzo de personas y animales genera una ratio hombre/caballo muy variable. Nicholson (1825: 55) concluyó que «la peor manera de aplicar la fuerza de un caballo es que cargue o arrastre un peso colina arriba; porque si la colina es empinada, tres hombres harán más que un caballo. [...] En una superficie plana, en cambio, un hombre no generará más de una séptima parte de la fuerza que tendría un caballo». Por otra parte, el uso de animales no siempre resultaba práctico. Como señala Coulomb (1799), las personas necesitamos menos espacio para trabajar que los animales, somos más fáciles de transportar y nuestros esfuerzos pueden resultar más fáciles de combinar.

El rendimiento de los animales todavía pequeños —y a menudo mal alimentados— de la Antigüedad y la temprana Edad Media estaba mucho más cerca del esfuerzo de los humanos que del de los poderosos caballos de tiro del siglo XIX. Los animales solían estar vendados (o ciegos) y enganchados directamente a las vigas, que estaban sujetas a un eje central cuya rotación se utilizaba para moler (principalmente grano, pero también arcilla para tejas), extraer (aceite de semillas, zumo de caña y frutas), o enrollar una cuerda atada a una carga (al elevar agua, carbón, mineral u hombres en una mina). A veces, los animales también servían para hacer girar tornos unidos a distintos tipos de engranaje y multiplicar así la ventaja mecánica.

La mala alimentación y el abuso de estos animales —obligados a caminar en un pequeño círculo durante horas— era habitual, como atestigua Apuleyo en *Las metamorfosis* o *El asno de oro* (siglo II d. C.):

> ¿Qué decir de los caballos —ya viejos y débiles— cuyas cabezas mis compañeros empujaban hacia el pesebre? Sus cuellos estaban heridos y desgastados; tosían continuamente; el recorrido del arnés había pelado sus costados; tenían las costillas rotas por culpa de los golpes y las pezuñas maltrechas debido al trabajo incesante; su piel era áspera y dura. Cuando vi este horrible espectáculo, temí llegar a un estado similar.

El abuso de los caballos continuó hasta bien entrado el siglo XIX: en la década de 1870, en Estados Unidos se utilizaban caballos para hacer funcionar miles de tornos en los estados de los Apalaches y el sur, tanto en granjas (molienda, extracción de aceite, compactación de fardos de algodón) como para el bombeo de agua y la elevación de cargas en minas (Hunter y Bryant, 1991). Caminaban en círculos de menos de 6 m de diámetro (véase figura 1.3). Antes de la adopción del tranvía eléctrico, en las ciudades occidentales había muchos caballos urbanos enganchados a ómnibus y carretas (recuadro 4.4; figura 4.18).

Los mismos factores que limitaban el uso de caballos como animales de tiro en la agricultura limitaron también su empleo para el transporte y la construcción. En los países de clima mediterráneo seco o las tierras bajas densamente pobladas de Asia, no se disponía de pasto de calidad ni de un suministro suficiente de pienso. Además, las herramientas de enganche (*harnessing*) eran deficientes y convertían la potencia de los animales de manera ineficiente. En las regiones áridas de Eurasia se utilizaron camellos para muchas tareas —mucho menos exigentes que los bueyes y los caballos en Europa atlántica—. En Asia, los elefantes domésticos (utilizados en la recolección de madera pesada, la construcción y la guerra) también ejercieron una presión considerable sobre los recursos alimenticios (Schmidt, 1996). Una fuente india clásica sobre elefantes ensalza su eficacia, pero también prescribe una alimentación costosa para elefantes recién capturados en fase de entrenamiento: arroz y plátanos hervidos mezclados con leche

y caña de azúcar (Choudhury, 1976). Si no caían enfermos, su potencia y notable longevidad compensaban con creces su elevado coste energético.

Los animales utilizados para el transporte y el trabajo estacionario abarcaban desde burros hasta elefantes. En algunas regiones, los «perros cocineros» de la raza Turnspit ayudaban en la cocina o tiraban de pequeñas carretas o carretillas. Con todo y de manera poco sorprendente, la modesta demanda nutricional de bueyes, búfalos de agua y yaks los convirtieron en los principales animales de trabajo para todo tipo de actividades. Los yaks eran inestimables como animales de carga debido a su habilidad para caminar en alta montaña y sobre la nieve. El rendimiento de tiro típico de los bovinos era, en el mejor de los casos, moderado. Si el camino estaba en buen estado, podían arrastrar cargas de 3-4 veces su peso corporal durante breves periodos de tiempo. Su trabajo constante no proporcionaba más de 300 W, tasa parecida a la de los caballos más viejos y débiles, que solían utilizarse en los tornos que ya hemos mencionado. Incluso antes de la aparición de la máquina de vapor, muchos de ellos fueron sustituidos por ruedas hidráulicas y molinos de viento, mucho más potentes.

RECUADRO 4.4

Caballos de tiro en el transporte urbano

En las ciudades se utilizaban caballos de tiro para la entrega de alimentos, combustible y materiales (en carros y carretillas de diferentes tamaños), así como para el transporte personal (en coches de alquiler y desde 1834 en su sustituto moderno, el taxi patentado por Joseph Hansom [1803-1882], generalmente conocido como *hansom*). A medida que las ciudades occidentales crecieron, la necesidad de transporte público condujo a la introducción de ómnibus tirados por caballos (*horse-buses*). Su uso comenzó en París, en 1828; un año después aparecieron en Londres y en 1833 en Nueva York, y más tarde en la mayoría de grandes ciudades orientales de Estados Unidos (McShane y

Tarr, 2007). En Nueva York, su número alcanzó un máximo de 683 vehículos en 1853.

Los tranvías sobre rieles tirados por caballos, habituales antes de la introducción de los tranvías eléctricos, hacia 1880, mejoraron la eficiencia del transporte. Los ómnibus más ligeros (para una docena de pasajeros) eran tirados por dos caballos, mientras que los modelos más habituales (con capacidad para 28 pasajeros) utilizaban cuatro caballos. Había salidas cada hora y muchas líneas seguían un recorrido de paradas preestablecidas (como ocurre actualmente), alcanzando destinos situados a 8-10 km del centro en más o menos una hora. Este tipo de caballo trabajaba duro y tenía que estar bien alimentado. McShane y Tarr (2007) mostraron que la ración diaria típica por animal era de 5-8 kg de avena y una cantidad similar de heno. El suministro de alimento a caballos urbanos fue un servicio importante en todas las grandes ciudades del siglo XIX.

Energía hidráulica

Antípatro de Tesalónica hizo en el siglo I a. C. la primera referencia literaria a un simple molino de agua que evita la durísima molienda manual (en Brunck, 1776: 119):

> ¡No pongáis las manos en el molino, mujeres que giráis la piedra de molino! Dormid bien aunque el canto del gallo anuncie el amanecer, porque Ceres ha encargado a las ninfas las labores que empleaban tus brazos. Estas, saliendo de la cima de una rueda, hacen girar su eje que, con la ayuda de radios móviles, activa el peso de cuatro molinos huecos. Volvemos a saborear la vida de los primeros hombres: hemos aprendido a disfrutar sin cansancio del trabajo de Ceres.

Con la notable excepción de los antiguos barcos de vela, el uso del viento comenzó aún más tarde. La obra de Al-Masudi, fechada en 947, es uno de los primeros registros fiables de molinos de viento de eje vertical simple (Forbes, 1965; Harverson, 1991). Su descripción presenta Sistán, en el actual Irán oriental, como una tierra de viento y arena en la que el viento impulsa los molinos y eleva el agua de los

arroyos para regar los jardines. Los sucesores de estos primeros molinos —con velas de caña trenzadas detrás de estrechas aperturas en altos muros de barro para crear un flujo de viento más potente— todavía estaban presentes en la región bien entrado el siglo XX. Ambos tipos de molino se difundieron con rapidez durante la Edad Media, aunque los de agua eran mucho más numerosos.

Su ubicuidad quedó atestiguada en el recuento del *Libro Domesday*, de 1086: en el sur y el este de Inglaterra había 5.624 molinos de agua, uno por cada 350 habitantes (Holt, 1988). El origen del diseño de las primeras ruedas hidráulicas horizontales es incierto, aunque suelen denominarse ruedas griegas o nórdicas. Se hicieron comunes en muchas regiones de Europa y al este de Siria. El impacto del agua corriente, generalmente dirigido mediante una canaleta de madera inclinada sobre paletas de madera que solían ajustarse a un cubo en una inclinación (*fitted to a hub at an incline*), hacía girar un eje robusto que podía ser fijado directamente a una piedra de molino que a su vez giraba encima (figura 4.9). Este diseño simple y relativamente ineficiente era el más adecuado para la molienda a pequeña escala. Los diseños posteriores, en los que el agua era conducida a través de un canal de madera con un agujero cónico (Wulff, 1966), tenían eficiencias superiores al 50% y una potencia máxima superior a 3,5 kW.

Las ruedas verticales suplantaron a las horizontales debido a su mayor eficiencia. Utilizaban engranajes en ángulo recto para hacer girar piedras de molino. La literatura occidental los conoce como molinos de Vitruvio, después de que el constructor romano diera la primera descripción clara de los *hydraletae*, fechada en 27 a. C. Sin embargo, Lewis (1997) piensa que el molino de agua se originó durante la primera mitad del siglo III a. C., muy probablemente en la Alejandría ptolemaica, y que en el siglo I d. C. la energía hidráulica ya era de uso común. En cualquier caso, debido a su eventual ubicuidad e importancia, existe mucha literatura que aborda su historia, diseño, usos y rendimiento (Bresse, 1876; Müller, 1939; Moritz, 1958; Forbes,

1965; Hindle, 1975; Meyer, 1975; White, 1978; Reynolds, 1983; Wölfel, 1987; Walton, 2006; Denny, 2007).

Aun así, es imposible estimar de manera fiable la contribución de la rueda hidráulica al suministro general de energía primaria de las sociedades antiguas y medievales. Wikander (1983) demostró que durante la época romana eran más comunes de lo que suele suponerse, y aunque por ahora solo se han identificado veinte molinos de agua de la Alta Edad Media, el *Libro Domesday* enumera unos 6.500 (Holt, 1988). Mi estimación es que incluso con hipótesis optimistas sobre la potencia unitaria y la adopción de ruedas hidráulicas en el Imperio romano, la energía hidráulica solo pudo representar el 1% de la energía mecánica útil suministrada por personas y animales de tiro (Smil, 2010c).

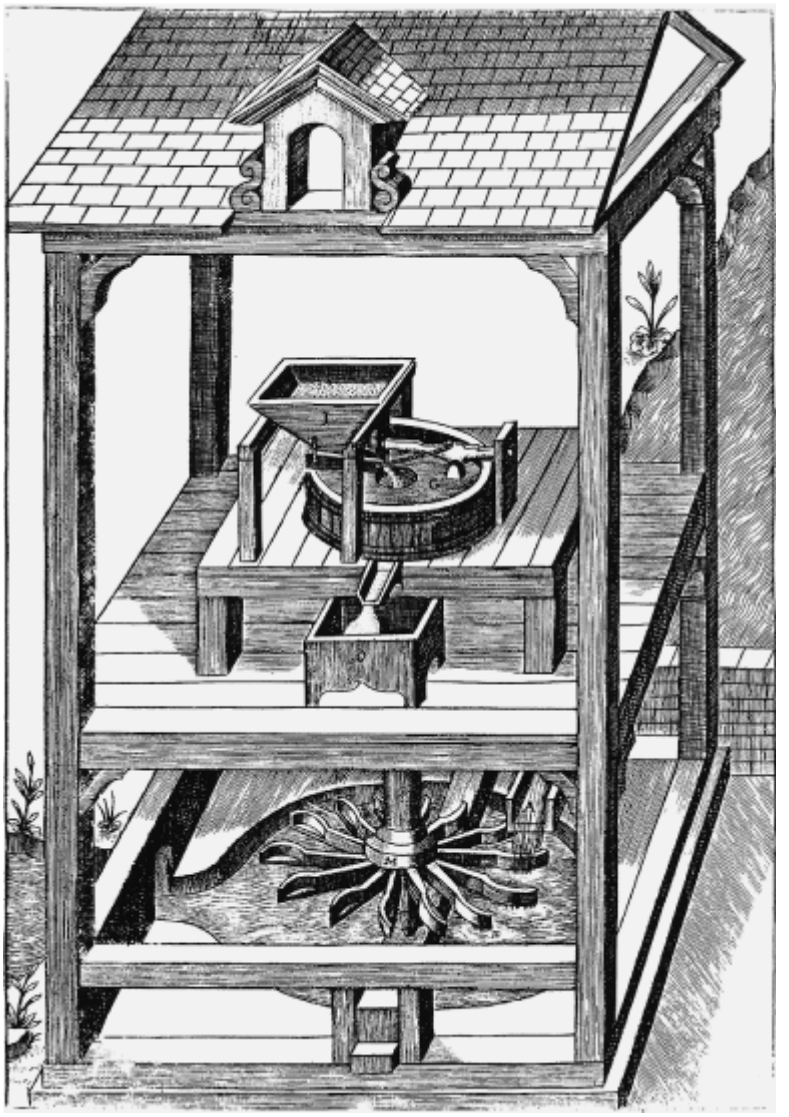


Figura 4.9 Rueda hidráulica horizontal, también llamada rueda griega o nórdica. La rueda era puesta en marcha por el impacto del agua corriente y hacía rotar directamente la piedra de molino situada encima suyo. Fuente: Ramelli (1976 [1588]).

Las ruedas hidráulicas verticales se clasifican según el punto de impacto. Las ruedas hidráulicas con canal de alimentación inferior eran impulsadas por la energía cinética del agua en movimiento (figura 4.10). Aunque funcionaban bien con un flujo lento pero constante, era especialmente deseable ubicarlas en corrientes rápidas, porque su máxima potencia teórica es proporcional al cubo de la velocidad del agua: doblando la velocidad se multiplica por ocho la capacidad

(recuadro 4.5). En los primeros embalses solo se utilizaron ruedas con cabezas (*heads*) pequeñas, de 1,5-3 m. Más tarde se añadieron tablas radiales (*radial boards*) con respaldo para evitar pérdidas de agua.

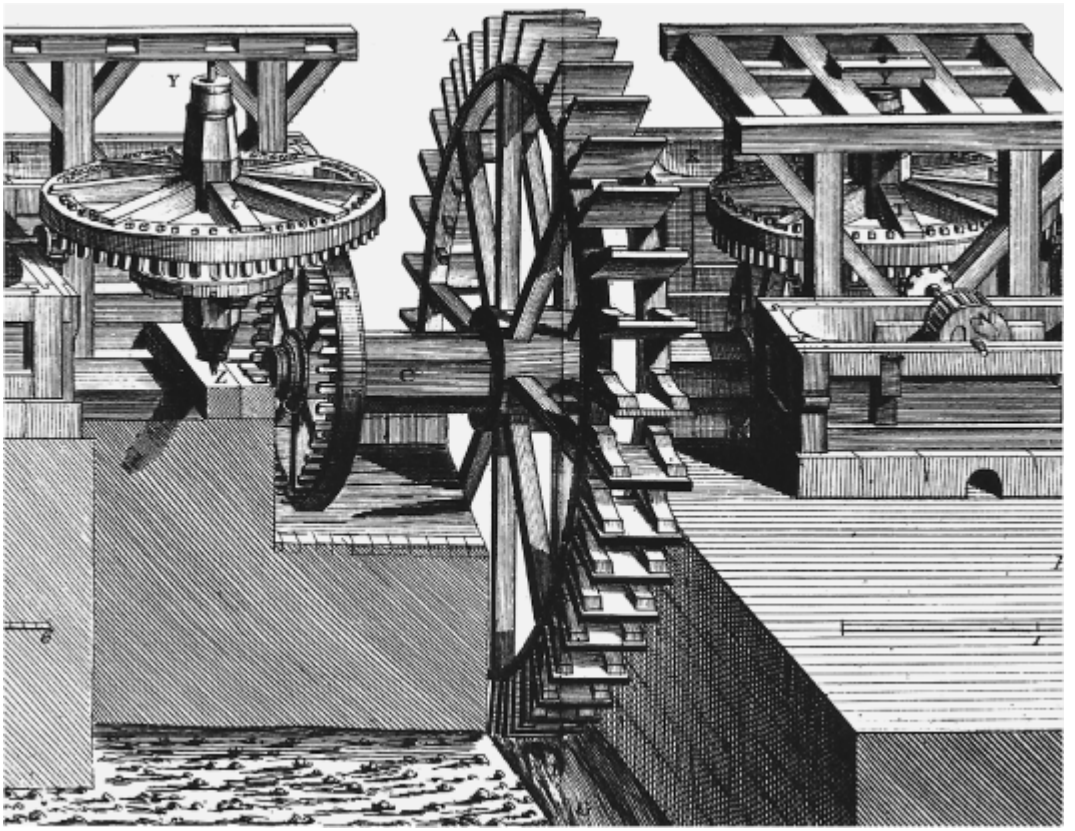
La retención de agua y, por tanto, la eficiencia de las ruedas hidráulicas con canal de alimentación inferior mejoró todavía más al dar al caudal de agua que pasaba por debajo de la rueda una forma de arco de 30º. El diseño más eficiente, introducido alrededor de 1800 por Jean-Victor Poncelet (1788-1867), incluía palas curvas y convertía un 20 % de la energía cinética del agua en energía útil; más adelante, durante ese mismo siglo, el rendimiento alcanzó un 35-45%. El diámetro de las ruedas era unas tres veces más grande que la cabeza (*head*) en el caso de las ruedas de paletas y 2-4 veces en el caso de las ruedas Poncelet.

Las ruedas hidráulicas con canal de alimentación a la altura del eje eran impulsadas por una combinación de movimiento del agua y caída por gravedad en ríos con cabezas (*heads*) de 2-5 m. El ajuste adecuado de las paletas era esencial para evitar el derrame prematuro de agua y, por tanto, el buen desempeño de la rueda.

RECUADRO 4.5

Potencia de una rueda hidráulica con canal de alimentación inferior

La energía cinética del agua corriente (en julios) es $0{,}5\ \rho v^2$, la mitad del producto de su densidad (ρ = 1.000 kg/m^3) y la velocidad al cuadrado (v en m/s). El número de volúmenes unitarios de agua que impactan en las paletas de la rueda por unidad de tiempo es igual a la velocidad del flujo, y, por lo tanto, la potencia teórica de la corriente es igual a su energía multiplicada por la velocidad. En condiciones ideales, un flujo de agua con una velocidad de 1,5 m/s y paletas giratorias con una sección transversal de 0,15 m^2 (aproximadamente 50 × 50 cm) podían generar algo más de 400 W de potencia. En realidad, una rueda medieval de madera con esas características generaba un movimiento de rotación útil no superior a 80 W (una quinta parte de la tasa teórica).


A
Y
R
e

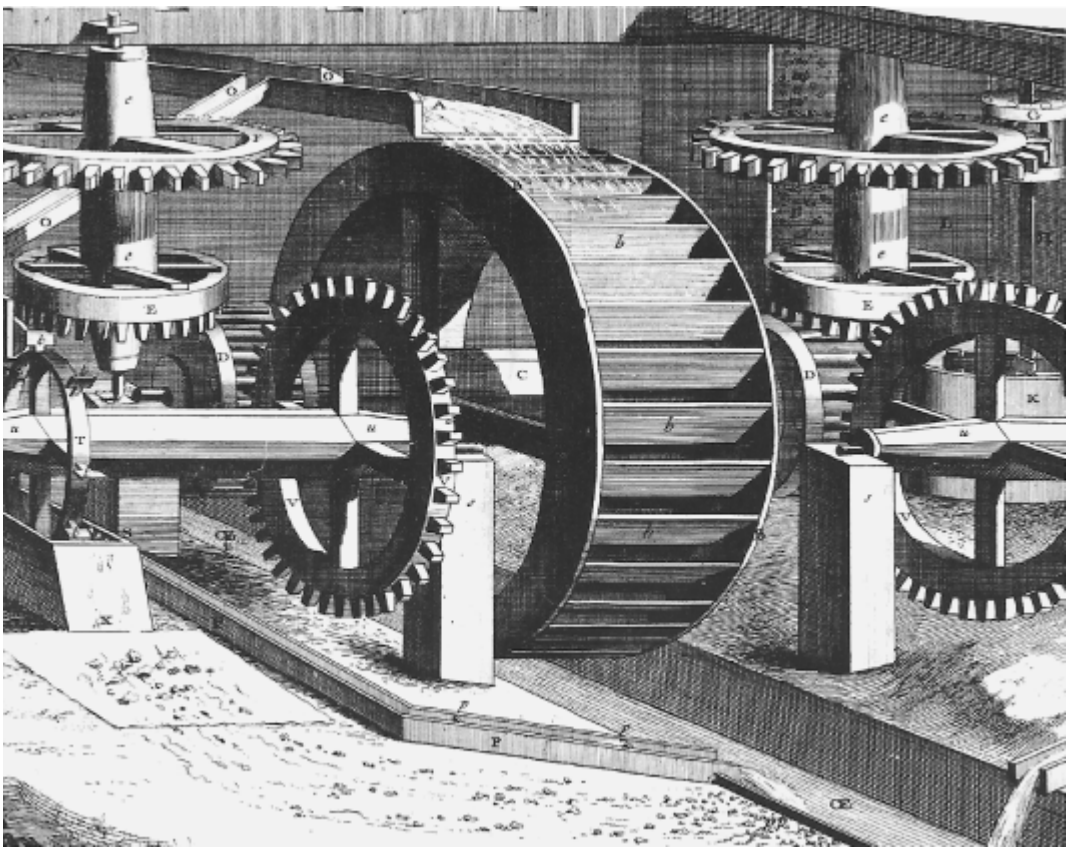


Figura 4.10 Grabados de una gran rueda hidráulica con canal de alimentación inferior en una fábrica de papel real francesa (arriba) y otra con canal de alimentación superior que acciona la maquinaria de lavado de minerales en una fragua francesa (abajo). Fuente: *Enciclopedia* (Diderot y D'Alembert, 1769-1772).

Las ruedas hidráulicas con canal de alimentación inferior a la altura del eje —en las que el agua entraba por debajo de la altura del eje central— no eran más eficientes que las ruedas con canal de alimentación inferior. En cambio, las ruedas con canal de alimentación superior a la altura del eje —en las que el agua entraba por encima de la altura del eje central— tenían un rendimiento parecido al de las ruedas con canal de alimentación superior. La rueda con canal de alimentación superior tradicional, impulsada en buena medida por la energía potencial gravitacional, operaba con cabezas (*heads*) de más de 3 m, y por lo general su diámetro era igual a tres cuartos de la cabeza (*head*) (figura 4.10). El agua se introducía a través de abrevaderos o canales en compartimentos tipo cubo a un ritmo de

entre menos de 100 y más de 1.000 l/s y velocidades de 4-12 rpm. Como la mayor parte de la fuerza de rotación se generaba por el peso del agua que caía, este tipo de rueda podía colocarse en los cursos de agua de flujo lento (recuadro 4.6).

Esta ventaja se veía en parte mermada por la necesidad de un suministro de agua bien dirigido y cuidadosamente regulado, que requería la frecuente construcción de estanques y acueductos. Una rueda con canal de alimentación superior con un exceso de capacidad de carga —es decir, con una pérdida de agua reducida de los cangilones (*buckets*)— podía ser más eficiente, aunque menos potente, que las máquinas a pleno rendimiento. Hasta bien entrado el siglo XVIII, se consideraba que este tipo de rueda era menos eficiente que la de alimentación inferior (Reynolds, 1979). El error fue subsanado durante la década de 1750 gracias a los escritos de Antoine de Parcieux y Johann Albrecht Euler y, sobre todo, mediante cuidadosos experimentos con modelos a escala realizados por John Smeaton (1724-1792), quien comparó la capacidad de la rueda hidráulica con la de otros motores primarios (Smeaton, 1759).

La posterior promoción de Smeaton de eficientes ruedas de alimentación superior ayudó a frenar la difusión de las máquinas de vapor, y sus experimentos (cuando llegó a la conclusión correcta de que la potencia de una rueda aumenta en relación al cubo de la velocidad del agua) establecieron un rango de eficiencia para las ruedas de alimentación superior de 52-76% (un 66% de media), en comparación con el 32% de las mejores ruedas de alimentación inferior (Smeaton, 1759). El moderno análisis teórico de Denny (2004) sobre la eficiencia de las ruedas hidráulicas arrojó resultados similares: un 71% para las ruedas de alimentación superior, un 30% para las de alimentación inferior y casi el 50% para las ruedas Poncelet. En la práctica, la eficiencia potencial del eje de una rueda de alimentación superior del siglo XX —bien diseñada y mantenida— era de casi el 90%, y podía convertir hasta un 85% de la energía cinética del agua en trabajo útil (Muller y Kauppert, 2004), aunque en

realidad solía alcanzarse una tasa de 60-70%, mientras que las mejores ruedas de alimentación inferior metálicas alemanas, diseñadas y fabricadas durante la década de 1930, alcanzaban una eficiencia de hasta el 76% (Müller, 1939).

RECUADRO 4.6

Potencia de las ruedas hidráulicas de canal de alimentación superior

La energía potencial del agua (en julios) es igual a mgh, el producto de la masa (en kg), la aceleración gravitatoria (9,8 m/s^2) y la cabeza (*head*) (altura en m). Por consiguiente, una rueda que contiene 0,2 m^3 de agua (200 kg) situada 3 m por encima del canal de descarga tiene una energía potencial de aproximadamente 6 kJ. Con un caudal de agua de 400 kg/s, la rueda tendría una potencia teórica de casi 12 kW. La potencia mecánica útil oscilaría entre menos de 4 kW para una rueda de madera de mucho peso y más de 9 kW para una rueda de metal del siglo XIX cuidadosamente elaborada y debidamente lubricada.

Las ruedas de alimentación inferior podían instalarse directamente en un arroyo, pero naturalmente esta ubicación aumentaba el riesgo de daños por inundación. Las ruedas de canal de alimentación superior o a la altura del eje requerían un suministro de agua regulado. El desvío de agua generalmente consistía en una presa y un canal que conducía la corriente hasta la rueda. En las regiones con precipitaciones bajas o irregulares era común acumular agua en estanques o detrás de pequeñas presas. También había que prestar atención al regreso del agua a la corriente: la acumulación de agua impedía la rotación de la rueda, y además tenía que crearse una corriente de cola suave para evitar el entarquinamiento del canal. Incluso en Inglaterra, las ruedas, los ejes y los engranajes eran casi completamente de madera hasta principios del siglo XVIII. Después se utilizó cada vez más el hierro fundido para los cubos y ejes. La primera rueda totalmente de hierro fue construida a principios del

siglo XIX (Crossley, 1990). Además de ruedas hidráulicas fijas, también existían ruedas flotantes, mucho menos comunes, instaladas en embarcaciones y molinos de marea. Los molinos de grano flotantes se utilizaron con éxito por primera vez en el Tíber en 537, cuando Roma fue asediada por los ostrogodos, que cortaron el agua del acueducto haciendo girar las ruedas de los molinos.

Los molinos de marea fueron comunes en las ciudades y pueblos de la Europa medieval y sus alrededores y muchos siguieron utilizándose hasta el siglo XVIII. El uso de la energía intermitente del mar fue documentado por primera vez en Basora, en el siglo X. Durante la Edad Media se construyeron pequeños molinos de marea en Inglaterra, Países Bajos, Bretaña y la costa atlántica de la península ibérica; más tarde llegaron a América del Norte y el Caribe (Minchinton y Meigs, 1980). Es posible que el molino de marea más importante y duradero del mundo fuera el que suministraba agua potable a Londres. Los primeros molinos de marea verticales, construidos después de 1582, fueron destruidos por el gran incendio de 1666, pero sus sustitutos funcionaron hasta 1822 (Jenkins, 1936). Tres ruedas, impulsadas por el agua que pasaba por los estrechos arcos del viejo puente de Londres, giraban en ambas direcciones (normalmente las ruedas solo funcionaban con la marea menguante), accionando 52 bombas de agua que elevaban 600.000 l de agua a una altura de 36 m.

Con todo, el uso dominante de la energía hidráulica siempre tuvo que ver con la molienda de grano: en la Inglaterra medieval, representaba el 90% de toda la actividad de molienda; el resto se utilizaba sobre todo para el empastado de telas (esponjado y engrosamiento de lana) y solo el 1% para otras actividades industriales (Lucas, 2005). Durante la Baja Edad Media la energía hidráulica se utilizó mucho para la trituración y fundición de minerales (fuelles de altos hornos [*blast furnace bellows*]) y en el aserrado de piedra y madera, torneado de madera, prensado de aceite, fabricación de papel, curtido, estirado de cables, estampado, corte,

esmerilado de metales, herrería, esmaltado de mayólica y pulido. Las ruedas hidráulicas inglesas también se utilizaban para el bobinado y el bombeo de agua en minas subterráneas (Woodall, 1982; Clavering, 1995).

Estas tareas se llevaban a cabo con ruedas hidráulicas cuya eficiencia era superior a la de las personas o los animales, y, por tanto, también con una productividad laboral mucho mayor. Además, la magnitud, continuidad y fiabilidad sin precedentes de la energía proporcionada por las ruedas hidráulicas abrió nuevas posibilidades productivas. Esto fue especialmente relevante en la minería y la metalurgia. De hecho, los cimientos energéticos de la industrialización occidental descansan en buena medida en los usos especializados de las ruedas hidráulicas. Los músculos humanos y animales nunca pudieron generar energía a un ritmo tan alto, concentrado, continuo y fiable, y, sin embargo, solo un flujo energético con estas características podía permitir aumentar la escala, velocidad y calidad de innumerables tareas industriales y de procesamiento de alimentos. No obstante, las ruedas típicas tardaron mucho tiempo en alcanzar potencias superiores a las de los grandes grupos de animales enganchados (*harnessed*).

Durante siglos, la única forma de alcanzar una mayor producción de energía fue instalar series de unidades más pequeñas en un emplazamiento adecuado. El ejemplo más conocido de esta concentración es la famosa línea de molinos romanos de Barbegal, cerca de Arles, que contaba con 16 ruedas, cada una de 2 kW de capacidad, para un total de poco más de 30 kW (Sellin, 1983). Greene (2000, 39) la calificó como «la mayor concentración conocida de energía mecánica del mundo antiguo», y Hodge (1990: 106) la describió como «algo que, según dicen los libros de texto, no existió nunca: una auténtica línea de montaje (*assembly-line factory*) romana antigua de producción de masa». Analizada de cerca, la realidad resulta menos impresionante (recuadro 4.7).

En cualquier caso, los molinos de agua de gran tamaño escasearon durante los siglos siguientes. Incluso durante las primeras décadas del siglo XVIII, los molinos europeos tenían una potencia media de menos de 4 kW. Solo unos pocos superaban los 7 kW, y el acabado en bruto y la baja calidad de los engranajes (que se traducía en una fricción elevada) daban lugar a eficiencias de conversión muy modestas. Incluso los molinos más admirados de la época —14 grandes ruedas hidráulicas (12 m de diámetro) construidas en el Sena, en Marly, entre 1680 y 1688— se quedaban cortos a la hora de cumplir con la tarea de bombear agua para las 1.400 fuentes y cascadas de Versalles. La potencia teórica del sistema era de 750 kW, pero la transmisión ineficiente de movimiento rotatorio (mediante el uso de largas varillas reciprocantes) reducía la potencia útil a 52 kW, lo cual era insuficiente para abastecer a todas las fuentes (Brandstetter, 2005).

RECUADRO 4.7

Noria de Barbegal

El sistema de 16 ruedas hidráulicas con canal de alimentación superior de Barbegal (probablemente construido a principios del siglo II) utilizaba agua de un acueducto cercano desviada mediante dos acequias con una pendiente de 30° (Benoit, 1940). Sagui (1948) utilizó hipótesis muy optimistas (un caudal de agua de 1.000 l/s, una velocidad de 2,5 m/s y una productividad de 24 t de harina/día) para concluir que el sistema de Barbegal producía harina suficiente para hacer pan para 80.000 personas. Sellin (1983) utilizó cifras más realistas (un caudal de 300 l/s y una velocidad de 1 m/s) y estimó que cada rueda tenía una potencia útil de 2 kW, es decir, unos 32 kW en total y (con un factor de capacidad del 50%) una producción diaria de 4,5 t de harina.

Sin embargo, Sellin adoptó la suposición de Sagui según la cual el 65% de la energía cinética del agua se convertía en energía cinética de una muela giratoria, mientras que los cuidadosos cálculos de Smeaton (1759) demostraron que la máxima eficiencia de este tipo de rueda en el siglo XVIII —muchísimo mejor diseñadas que las más antiguas— era del 63%. La combinación de un flujo menor —Leveau (2006) argumentaba a favor de 240-260 l/s— y una menor eficiencia (digamos un 55%) conllevaría una potencia

de 1,5 kW por rueda —el equivalente de 3-4 caballos romanos enganchados a un torno— y una capacidad de producción de harina de 3,4 t/día, suficiente para alimentar a 11.000 personas. Se trata de un rendimiento mucho mayor que el de los molinos típicos del siglo II d. C., desde luego, pero menor que el de un prototipo de producción a gran escala.

Las pequeñas ruedas hidráulicas también tuvieron un gran impacto económico. Incluso suponiendo que la harina suministrara la mitad del consumo diario de energía alimentaria de las personas, un pequeño molino de agua con menos de 10 trabajadores producía suficiente harina en un día (10 h de molienda) para alimentar a 3.500 personas —un pueblo medieval de tamaño medio—, mientras que la molienda manual habría requerido como mínimo 250 trabajadores. Y con el surgimiento de nuevos e innovadores diseños a finales del siglo XVIII, las ruedas hidráulicas marcaron una enorme diferencia de productividad. Un ejemplo perfecto es la introducción de maquinaria accionada por agua para cortar y encabezar 200.000 clavos al día, patentada en Estados Unidos en 1795 (Rosenberg, 1975), y que condujo a una reducción del 90% en el precio de los clavos durante los siguientes cincuenta años.

La rueda hidráulica siempre fue el convertidor tradicional de energía más eficiente —más incluso que las mejores máquinas de vapor, que a finales del siglo XIX convertían no más del 15% del carbón en energía útil (Smil, 2005)—. Ningún otro motor principal tradicional proporcionaba tanta potencia continua. Fue indispensable durante las primeras etapas de la industrialización en Europa y Norteamérica y alcanzó su apogeo —en términos tanto de capacidad unitaria y total como de diseño y eficiencia— durante el siglo XIX, en paralelo al surgimiento y eventual dominio de la máquina de vapor, el nuevo motor primario que acabaría por eclipsar la importancia de la energía hidráulica.

Con todo, durante las seis primeras décadas del siglo XIX se añadió más capacidad hidráulica que nunca, y muchas ruedas hidráulicas siguieron funcionando incluso cuando la energía de vapor y más adelante la electricidad se impusieron como motores primarios dominantes. Daugherty (1927) estimó que la capacidad instalada total de las ruedas hidráulicas en Estados Unidos en 1849 era de 500 MW (<7% de todos los motores primarios, incluyendo los animales de trabajo y excluyendo la mano de obra humana), en comparación con los 920 MW de las máquinas de vapor. La comparación del trabajo útil es aún más reveladora: Schurr y Netschert (1960) calcularon que en 1850 las ruedas hidráulicas de Estados Unidos suministraron 2,4 PJ de trabajo útil (2,25 veces el de los motores de vapor alimentados con carbón); que en 1860 todavía estaban un 30% por delante; y que la energía de vapor solo superó a la hidráulica a finales de la década de 1860. En 1925, había 33.500 ruedas hidráulicas en funcionamiento en Alemania (Muller y Kauppert, 2004) e incluso después de 1950 en Europa todavía funcionaban muchas ruedas.

Las grandes fábricas textiles del siglo XIX dependían especialmente de la energía hidráulica. Por ejemplo, la Merrimack Manufacturing Company, que fue la primera fábrica de tejidos totalmente integrada de América (principalmente de tejidos de calicó), fue creada en 1823 en Lowell, Massachusetts, y dependía de 2 MW de energía hidráulica proveniente de una gran caída de agua (10 m) en el río Merrimack (Malone, 2009). En 1840, la mayor instalación británica —la obra hidráulica (*waterworks*) de 1,5 MW de Shaw, en Greenock, cerca de Glasgow— se componía de 30 ruedas organizadas en dos filas en una pendiente escarpada y alimentadas por un gran depósito. Las ruedas hidráulicas más grandes tenían un diámetro de 20 m, 4-6 m de ancho y capacidades ampliamente superiores a 50 kW (Woodall, 1982).

La rueda más grande del mundo fue la Lady Isabella, diseñada por Robert Casement y construida en 1854 por la Gran Compañía Minera de Laxey en la isla de Man para bombear el agua de las minas de Laxey. Se trataba de una rueda con canal de alimentación superior

(*pitchback overshot machine*) (2,5 rpm) con un diámetro de 21,9 m y 1,85 m de anchura; sus 48 radios (9,75 m de longitud) eran de madera, pero el eje y las barras de dibujo diagonales eran de hierro fundido (Reynolds, 1970). Todas las corrientes situadas encima de la rueda eran desviadas hacia un depósito recolector, el agua era canalizada hacia la base de la torre de mampostería y después subía por un canal de madera. La energía se transmitía a la varilla de bombeo (*pump rod*), alcanzando 451 m hasta el fondo del pozo minero de plomo-zinc, por la manivela del eje principal y 180 m de bielas de madera (*connecting rods*). La potencia máxima teórica de la rueda era de 427 kW, aunque normalmente generaba una potencia útil de 200 kW. La rueda funcionó hasta 1926 y fue restaurada después de 1965 (Patrimonio Nacional de Manx, 2015) (figura 4.11).

La era de las ruedas hidráulicas gigantes fue muy breve. En el preciso momento en que empezaron a construirse, durante la primera mitad del siglo XIX, el desarrollo de turbinas de agua supuso la primera mejora radical en los motores primarios impulsados por agua desde la introducción de las ruedas verticales siglos atrás. La primera turbina de reacción de flujo radial externo (*reaction turbine with radial outward flow*), de Benoît Fourneyron, fue construida en 1832 para accionar (*power*) martillos de forja en Fraisans. Incluso con una cabeza (*head*) muy baja (1,3 m) y un diámetro de rotor de 2,4 m, tenía una capacidad de 38 kW. Cinco años más tarde, dos versiones mejoradas instaladas en la hilandería de Sankt Blasien, en Alemania, tenían una potencia de 45 kW y cabezas (*heads*) de 108 y 114 m (Smith 1980).

Figura 4.11 La noria de agua o rueda hidráulica Gran Laxey después de la restauración (Corbis).

El rendimiento de la turbina de Fourneyron fue superado muy pronto por un innovador diseño de turbina de flujo mixto (*inward-flow turbine*), conocida como turbina Francis en honor al ingeniero angloestadounidense que la inventó, James B. Francis (1815-1892). Más tarde llegaron las turbinas de flujo transversal (*jet-driven turbines*) de Lester A. Pelton (patentadas en 1889) y las turbinas de flujo axial (*axial flow turbines*) de tipo Viktor Kaplan (en 1920). Estos diseños sustituyeron a las ruedas hidráulicas como motores primarios en muchas industrias. En Massachusetts representaban el 80% de la potencia instalada en 1875. Fue la época en la que los motores hidráulicos (*water-driven machines*) tuvieron mayor importancia en una sociedad en rápida industrialización.

Por ejemplo, los tres principales centros textiles situados en el río Merrimack, Lowell, Lawrence y Manchester, en Massachusetts y el sur

de New Hampshire, disponían de 7,2 MW de energía hidráulica. La cuenca fluvial en su conjunto tenía una capacidad instalada de 60 MW, con una media de 66 kW por centro manufacturero o fábrica (Hunter, 1975). A mediados de la década de 1850, el vapor todavía costaba tres veces más caro que el agua en Nueva Inglaterra. La era de las turbinas hidráulicas como motores primarios directos terminó de forma bastante abrupta. En 1880, la minería de carbón a gran escala y la mejora de la eficiencia de los motores lograron que el vapor fuera más barato que la energía hidráulica en casi cualquier punto de Estados Unidos. Y antes de que terminara el siglo muchas turbinas hidráulicas ya no suministraban energía directa, sino que servían para alimentar generadores de electricidad.

Energía eólica

La historia del viento como energía estacionaria (en contraposición a la historia, mucho más larga, de la conversión del viento en movimiento mediante el uso inteligente de las velas) y la evolución de los molinos de viento tradicionales hacia complejas y potentes máquinas durante la era industrial temprana han sido bien cubiertas por análisis locales y globales. Entre las contribuciones generales más notables se encuentran las de Freese (1957), Needham (1965), Reynolds (1970), Minchinton (1980) y Denny (2007). Importantes estudios locales son los de Skilton (1947) y Wailes (1975) sobre los molinos británicos; Boonenburg (1952), Stockhuyzen (1963) y Husslage (1965) sobre los famosísimos molinos holandeses; y Wolff (1900), Torrey (1976), Baker (2006) y Righter (2008) sobre los molinos estadounidenses, que desempeñaron un papel tan clave como poco reconocido en la conquista del Oeste. Los molinos de viento fueron los motores primarios más potentes de la era preindustrial en las llanuras, donde la práctica ausencia de saltos de agua impedía la construcción de ruedas hidráulicas (como en los Países Bajos, Dinamarca y buena parte de Inglaterra), y en distintas regiones áridas de Asia y Europa con vientos estacionalmente fuertes.

La contribución de los molinos de viento a la intensificación económica mundial fue menos decisiva que la de las ruedas hidráulicas, principalmente porque su uso solo se hizo habitual en algunas regiones de la Europa atlántica. Los primeros registros fiables de molinos de viento europeos datan de las últimas décadas del siglo XII. Según Lewis (1993), su uso se extendió primero desde Persia al territorio bizantino, donde se transformaron en máquinas verticales (*vertical machines*) descubiertas por los cruzados. A diferencia de los molinos orientales, cuyas velas giraban en un plano horizontal alrededor de un eje vertical, estos molinos rotaban verticalmente sobre un eje horizontal cuyos ejes de transmisión giraban con el viento. Con excepción de los molinos de velas octogonales de la península ibérica, que utilizaban tela triangular (*triangular cloth*) (tecnología importada del Mediterráneo oriental), los primeros molinos europeos fueron todos de poste. La estructura, de madera, los engranajes y las piedras de molino giraban sobre un enorme poste central sostenido por cuatro barras diagonales (figura 4.12). Como no podían realinearse cuando la dirección del viento cambiaba, había que girarlos manualmente para ponerlos cara al viento. Además, eran inestables con vientos fuertes y vulnerables en caso de tormenta y su altura relativamente baja limitaba su pico de potencia (recuadro 4.8).

Si bien los molinos de poste siguieron funcionando en algunas regiones de Europa oriental hasta el siglo XX, en Europa occidental fueron sustituidos gradualmente por molinos de torre y molinos de tipo holandés (*smock mills*), en los que solo la parte superior (*top cap*) giraba con el viento. Los molinos holandeses tenían un marco de madera, generalmente octogonal, cubierto con listones de madera o tejas. Los molinos de torre solían ser estructuras de piedra circulares y cónicas. Las aspas (*sails*) solo comenzaron a rotar automáticamente a partir de 1745, después de que los ingleses añadieran abanicos de aspas (*fantail*) para alimentar bobinas (*power a winding gear*). Curiosamente, los holandeses, que eran los que tenían el mayor

número de molinos de viento en Europa, no adoptaron esta innovación hasta principios del siglo XIX.

Con todo, los molineros holandeses fueron los primeros en introducir diseños de aspas más eficientes. Hacia 1600 agregaron vanguardistas tablas inclinadas a las aspas, previamente planas. El arqueamiento resultante les dio a las aspas más sustento (*lift*) y redujo la resistencia. Posteriormente también introdujeron mejoras en el montaje de las aspas, engranajes de metal fundido y un regulador centrífugo (*centrifugal regulating governor*). Este dispositivo acabó con la difícil y a menudo peligrosa tarea de ajustar la lona en función de la velocidad del viento. A finales del siglo XIX, los ingleses instalaron auténticos perfiles aerodinámicos, con aspas de contorno aerodinámico y gruesos bordes delanteros (*thick leading edges*). Las aplicaciones más comunes eran la molienda y el bombeo de agua (también en barcos, mediante pequeños dispositivos portátiles). Los molinos de viento también se utilizaron tanto en Europa como en el mundo islámico para moler y triturar (tiza, caña de azúcar, mostaza o cacao), fabricar papel, aserrar y trabajar metales (Hill, 1984).

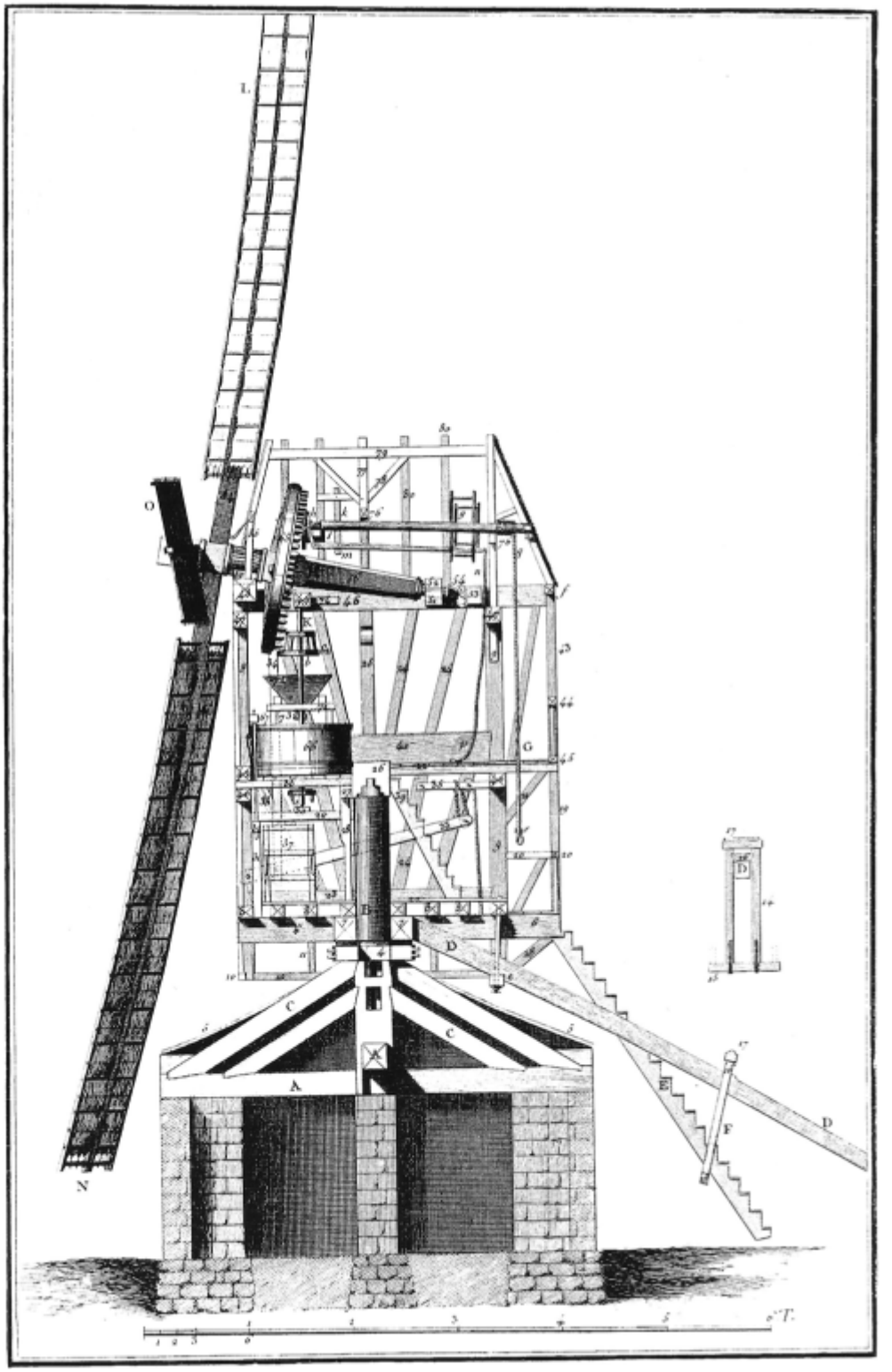


Figura 4.12 Molino de viento de poste. El poste principal de madera, casi siempre de roble, estaba sostenido por cuatro vigas y equilibraba la estructura. La rotación del molino se transfería a la piedra de molino (*millstone*) mediante un piñón de linterna.

El único acceso era una escalera. Fuente: *Enciclopedia* (Diderot y D'Alembert, 1769-1772).

RECUADRO 4.8

Energía eólica

La velocidad media del viento aumenta con una potencia de 1/7 de la altura ($z^{1/7}$). Así, por ejemplo, a 20 m por encima del suelo será un 22% mayor que a 5 m. La energía cinética de 1 m^3 de aire (en julios) es igual a $0{,}5\rho v^2$, donde ρ es la densidad del aire (0,12 kg/m^3 cerca del suelo) y v la velocidad media del viento (en m/s). La energía eólica (en vatios) es el producto de la energía del viento, un área perpendicular a la dirección del viento barrida por las palas de la máquina (A, en m^2) y la velocidad del viento al cubo: $0.5\rho AV^3$. Como la energía eólica aumenta con el cubo de la velocidad media, al duplicar la velocidad se multiplica por ocho la potencia disponible. Los molinos de viento más antiguos (pesados y mal engranados) necesitaban vientos de 25 km/h (7 m/s) para empezar a moler o bombear; a velocidades inferiores solo giraban lentamente, mientras que las aspas tenían que ser ajustadas a velocidades superiores a 10 m/s y enrolladas a más de 12 m/s, proporcionando apenas una ventana estrecha (5-7 h/día) de rotación y trabajo útiles (Denny, 2007). Como es lógico, todo esto favoreció emplazamientos con vientos fuertes y sostenidos. Más adelante, el diseño de molinos más eficientes y mejor lubricados y engranados permitió funcionar con vientos de 4 m/s y generar 10-12 h/día de trabajo útil. Como la mayoría de molinos de viento medían menos de 10 m, las sociedades preindustriales solo podían captar el viento cercano al suelo. Los flujos de viento también varían mucho en función del momento y el lugar. Incluso en emplazamientos ventosos, la velocidad anual media del viento puede fluctuar hasta un 30%, de tal modo que desplazar un molino 30-50 m puede reducir o aumentar hasta en un 50% su trabajo útil. La limitada capacidad de transporte terrestre durante la era preindustrial impidió ubicar molinos en los lugares más ventosos. Por otra parte, los molinos solían estar fijos.

Ningún molino de viento extrae toda la energía eólica disponible: ¡esto significaría parar la corriente de aire por completo! La máxima energía extraíble es 16/27 (casi el 60%) del flujo de energía cinética (Betz, 1926). Durante la era preindustrial, el rendimiento real fue de 20-30%. Por tanto, un molino de torre del siglo XVI-II con aspas de 20 m de diámetro tenía una

potencia teórica de 189 kW y una velocidad de 10 m/s, pero proporcionaba menos de 50 kW.

En los Países Bajos hicieron todas estas cosas, pero su mayor contribución fue drenar las tierras bajas del país y construir pólderes para los campos de cultivo. Los primeros molinos de drenaje holandeses datan de principios del siglo XV, pero solo se hicieron comunes en el siglo XVI. El poste hueco de los *wipmolen* hacía girar grandes ruedas de madera con aspas; el *tjasker*, móvil y más pequeño, hacía girar tornillos de Arquímedes; pero solo los eficientes molinos holandeses (smock *smills*) proporcionaban la energía necesaria para la creación de pólderes a gran escala. En la región de Zaanse Schans, en el norte del país, se construyeron 600 molinos después de 1574, algunos de los cuales se conservan (Zaanse Schans, 2015). Los molinos holandeses más altos (33 m) estaban en Schiedam (cinco de los treinta originales siguen en pie) y servían para moler grano para la producción de *jenever* (ginebra holandesa).

Los viejos molinos estadounidenses, como los de la costa de Massachusetts, solían utilizarse para la extracción de sal. Nunca se construyeron muchos. Los nuevos molinos estadounidenses aparecieron a partir de la segunda mitad del siglo XIX, con la expansión hacia las Grandes Llanuras. La falta de manantiales naturales requería el bombeo de agua de los pozos, mientras que la escasez de pequeños arroyos y el carácter errático de las precipitaciones impedían el uso de pequeñas norias de agua. En lugar de apostar por molinos de tipo holandés (es decir, por pesadas y costosas máquinas con pocas aspas (*sails*), pero grandes y anchas), se utilizaron molinos más pequeños, sencillos y asequibles —y sin embargo eficientes— en estaciones de ferrocarril y granjas individuales.

Solían tener un gran número de palas o listones (*blades or slats*) relativamente estrechos, fijados a ruedas sólidas o seccionales (*solid or*

sectional wheels) y equipados con el gobernador centrífugo o de paletas laterales y timones independientes. Se colocaban sobre torres de celosía de 6-25 m de altura y se utilizaban para bombear agua para los hogares, el ganado o las locomotoras de vapor (figura 4.13). Estos molinos, el alambre de espino y el ferrocarril fueron los artefactos icónicos de la apertura de las Grandes Llanuras (Wilson, 1999). Daugherty (1927) estima que la capacidad total de los molinos de viento en Estados Unidos pasó de 320 MW en 1849 a casi 500 MW en 1899 y alcanzó un máximo de 625 MW en 1919.

No tenemos información sobre la potencia de los primeros molinos. La primera medición fiable es de finales de la década de 1750: John Smeaton calculó que la potencia de un molino holandés común con aspas de 9 m era igual a la de 10 hombres o 2 caballos (Smeaton, 1759). Este cálculo, basado en mediciones con un modelo pequeño, fue corroborado por el rendimiento real en el prensado de semillas oleaginosas. Mientras que los corredores impulsados por molinos (windmill-powered *runners*) giraban 7 veces por minuto, 2 caballos daban 3,5 vueltas en el mismo tiempo. Un típico molino holandés de gran tamaño del siglo XVIII con una envergadura de 30 m podía generar 7,5 kW (Forbes, 1958). Una medición más reciente realizada en un molino de drenaje holandés de 1648 bien conservado, capaz de elevar 35 m^3 con vientos de 8-9 m/s, indica una potencia máxima (*windshaft power*) de 30 kW, aunque las grandes pérdidas de transmisión redujeran la potencia útil a menos de 12 kW.

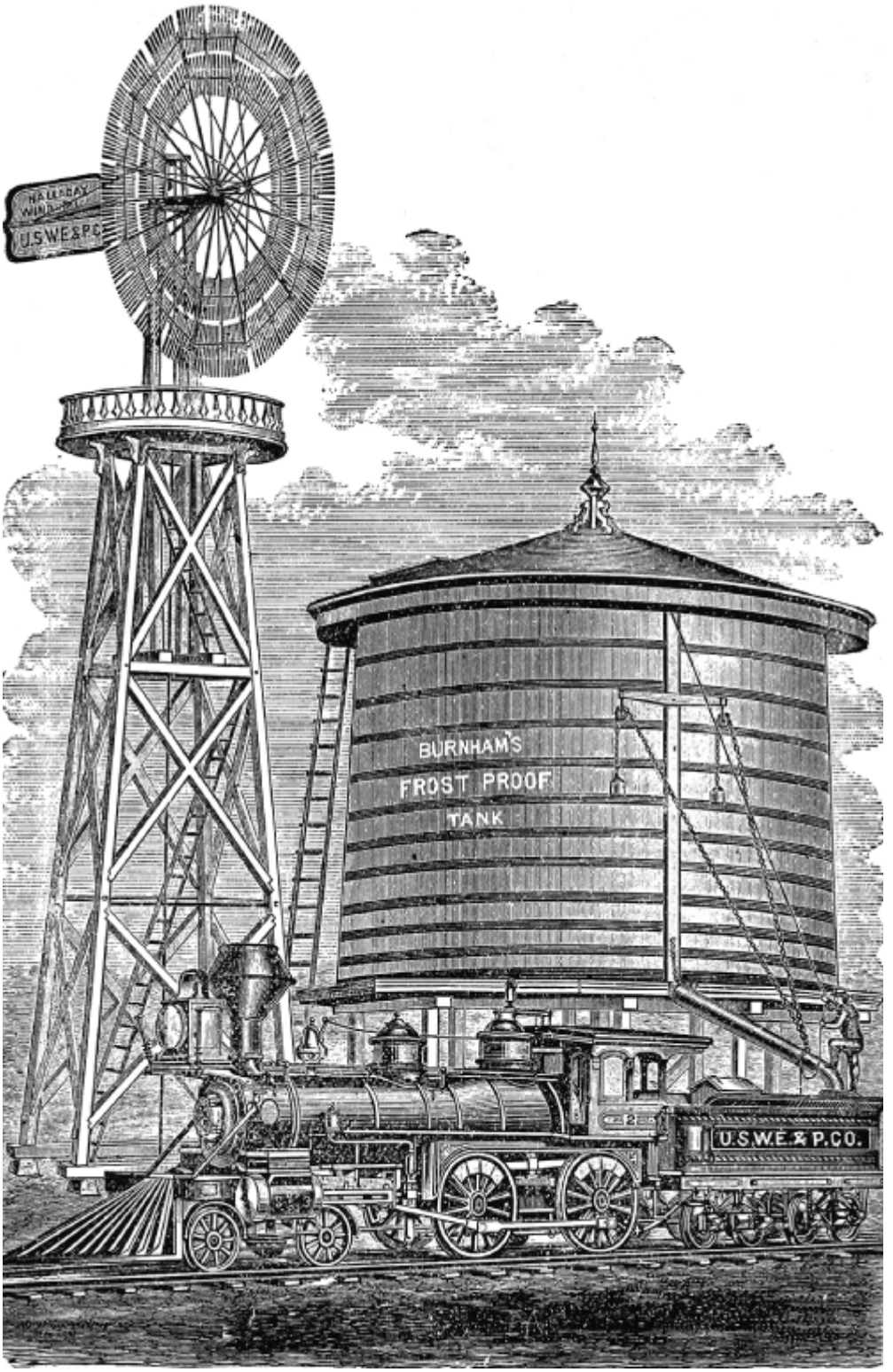


Figura 4.13 Molino de viento Halladay. Durante la última década del siglo XIX, Halladay fue la marca estadounidense de molinos más popular. Eran comunes en las

estaciones de tren del oeste, donde bombeaban agua para las locomotoras de vapor. Fuente: Wolff (1900).

Todos estos resultados confirman la comparación que Rankine hizo de los principales motores primarios tradicionales. Rankine situó la potencia útil de los molinos de poste en 1,5-6 kW y la de los de torre (*tower mills*) en 4,5-10,5 kW (Rankine, 1866). Las mediciones de los molinos estadounidenses sitúan su potencia útil entre 30 W para pequeños molinos de 2,5 m y 1.000 W para grandes molinos de 7,6 m (Wolff, 1900). Los rangos típicos de potencia útil eran 0,1-1 kW para los diseños estadounidenses del siglo XIX, 1-2 kW para los molinos de poste de pequeño tamaño y 2-5 kW para los de gran tamaño, 4-8 kW para los molinos holandeses y los molinos de torre, y 8-12 kW para los molinos más grandes del siglo XIX. Esto significa que el típico molino de viento medieval era tan potente como una noria contemporánea, aunque a principios del siglo XIX muchas norias eran hasta cinco veces más potentes que los mayores molinos de torre, diferencia que no hizo sino aumentar con el desarrollo posterior de las turbinas de agua.

Como ocurrió con las ruedas hidráulicas, la producción de energía estacionaria con molinos de viento alcanzó su punto álgido durante el siglo XIX. En 1800 había 10.000 molinos activos en Reino Unido; a finales del siglo XIX, 12.000 en Países Bajos y 18.000 en Alemania; y en 1900, 30.000 en los países del mar del Norte, con una capacidad total de 100 MW (De Zeeuw, 1978). En Estados Unidos, durante la expansión hacia el oeste, entre 1860 y 1900, se construyeron varios millones de molinos. Su número solo comenzó a bajar a principios de la década de 1920. En 1889 había 77 fabricantes. Halladay, Adams y Buchanan eran las principales marcas (Baker, 2006). Y durante el siglo XX se utilizaron numerosos molinos estadounidenses de bombeo de agua en Australia, Sudáfrica y Argentina.

COMBUSTIBLES DE BIOMASA

Casi todas las sociedades tradicionales producían calor y luz mediante la quema de combustibles de biomasa (o biocombustibles). La fitomasa leñosa (*woody phytomass*), el carbón derivado de ella, el estiércol seco y los residuos agrícolas proporcionaban toda la energía necesaria para la calefacción, la cocina y el alumbrado de los hogares y las pequeñas manufacturas artesanales. Más adelante, en las grandes empresas protoindustriales se utilizaron biocombustibles para cocer grandes cantidades de ladrillos y cerámica, fabricar vidrio y fundir y dar forma a los metales. Las únicas excepciones notables fueron la antigua China —donde en el norte se utilizaba carbón para la fabricación de hierro y en Sichuan gas natural para evaporar salmueras y producir sal (Adshead, 1997)— y la Inglaterra medieval (Nef, 1932).

El suministro de biocombustibles podía resultar tan sencillo como realizar un breve desplazamiento diario a un bosque, un matorral o una ladera cercanos para recoger ramas caídas y romper ramas secas o recoger hierba seca o algo de paja seca después de la cosecha. Sin embargo, la cruda realidad es que solía implicar largas excursiones —principalmente de mujeres y niños— para recolectar biomasa combustible, tala de árboles, fabricación de carbón vegetal y transporte a larga distancia del combustible en carros tirados por bueyes o en caravanas de camellos a ciudades situadas en regiones deforestadas o desérticas, todas ellas actividades laboriosas e incluso agotadoras. La abundancia o escasez de combustible afectaba al diseño de la vivienda, la cocina y la vestimenta. El suministro de biocombustibles fue una de las principales razones de la deforestación tradicional.

En Europa occidental, esta dependencia se redujo rápidamente después de 1850. Las mejores reconstrucciones históricas de producción de energía primaria muestran que a mediados de la década de 1870 en Francia el carbón proporcionaba más de la mitad de toda

la energía combustible, mientras que en Estados Unidos el carbón y el petróleo (y un poco de gas natural) superaron el contenido energético de la leña a partir de 1884 (Smil, 2010a). Con todo, en muchas regiones la dependencia respecto a los biocombustibles siguió hasta bien entrado el siglo XX: en los países más poblados de Asia fueron dominantes hasta la década de 1960 o 1970, y en África subsahariana todavía son la mayor fuente de energía primaria.

Este uso continuado ha permitido analizar las modalidades y las consecuencias de la combustión ineficiente de biocombustibles tradicionales y su impacto en la salud. Así, los análisis realizados en las últimas décadas (Earl, 1973; Smil, 1983; RWEDP, 2000; Tomaselli, 2007; Smith, 2013) nos ayudan a entender la larga historia de los biocombustibles preindustriales. Muchas conclusiones recientes son perfectamente aplicables al entorno preindustrial, porque el requisito energético tradicional básico no ha cambiado: preparar 2-3 comidas/día, en los climas fríos calentar al menos una habitación y en ocasiones también preparar pienso para animales y secar alimentos.

Madera y carbón vegetal

La madera se utilizaba en cualquiera de sus formas: ramas, cortezas y raíces caídas, rotas o cortadas —aunque la madera cortada solo estaba disponible donde eran comunes las buenas herramientas de corte: azadas, hachas y sierras posteriores—. Sorprendentemente, la variedad de madera hizo muy poca diferencia. Hay miles de plantas leñosas y, aunque existen diferencias físicas sustanciales entre ellas —la densidad de algunos robles casi dobla la de ciertos álamos—, su composición química es notablemente uniforme (Smil, 2013a). La madera está compuesta de dos quintos de celulosa, un tercio de hemicelulosa y un cuarto de lignina; en términos elementales, el carbono representa el 45-56% de su masa total y el oxígeno, el 40-42%. El contenido energético de la madera aumenta con la proporción de lignina y resinas (que contienen respectivamente 26,5 MJ/kg y hasta 35 MJ/kg, en comparación con los 17,5 MJ/kg de la celulosa), aunque las

diferencias entre especies leñosas comunes son pequeñas, generalmente 17,5-20 MJ/kg para las maderas duras y, debido a su mayor contenido de resina, 19-21 MJ/kg para las maderas blandas (recuadro 4.9).

La densidad energética de la madera siempre debería hacer referencia a la materia absolutamente seca. Sin embargo, la madera que se utilizaba en las sociedades tradicionales tenía una humedad muy variable. Las maderas duras recién cortadas (árboles frondosos) suelen contener un 30% de agua, mientras que las maderas blandas (coníferas) superan ampliamente el 40%. Esta madera se quema de manera ineficiente, dado que una parte significativa del calor liberado vaporiza la humedad liberada en lugar de calentar una olla o habitación. Cuando la humedad de la madera es superior al 67%, no se enciende. Por eso las ramas secas caídas y los pedazos de árboles muertos siempre fueron mejores que la madera fresca, y por eso se secaba siempre al aire la madera antes de la combustión. La madera cortada se apilaba, se abrigaba y se dejaba secar durante meses, e incluso así, en climas secos todavía retenía el 15% de humedad. En contraste, el carbón vegetal solo contiene un rastro de humedad, motivo por el cual aquellos que podían permitirse su precio siempre lo prefirieron.

El carbón vegetal es un combustible de alta calidad y virtualmente no fumígeno. Su contenido energético es un 50% más alto que el de la madera secada al aire libre (igual que el del buen carbón bituminoso). Su otra gran ventaja es su pureza. Como virtualmente es un carbón puro, apenas contiene azufre o fósforo. Esto lo convierte en el mejor combustible posible no solo para uso de interior, sino también para hornos de producción de ladrillos, tejas y cal y fundición de minerales. Otra ventaja para la fundición es su alta porosidad (0,13-0,20 g/cm^3), que facilita el ascenso de los gases reductores (*reducing gases*) en las chimeneas (Sexton, 1897). Con todo, la producción tradicional de este excelente combustible era muy cara.

RECUADRO 4.9

Contenido energético de los biocombustibles

Biocombustible	Agua (%)	Contenido energético de la materia seca (MJ/kg)
Madera dura	15-50	16-19
Madera blanda	15-50	21-23
Carbón vegetal	<1	28-30
Residuos de cultivos	5-60	15-19
Paja seca	7-15	17-18
Estiércol seco	10-20	8-14

Fuentes: Smil (1983) y Jenkins (1993).

La combustión parcial de la madera apilada en la tierra primitiva o los hornos de foso genera el calor necesario para la carbonización. Por consiguiente, no hay necesidad de combustible adicional, aunque tanto la calidad como la cantidad de los productos finales son difíciles de controlar. El rendimiento típico del carbón vegetal en estos hornos era del 15-25% del rendimiento de la madera secada al aire. Esto significa que un 60% de la energía original se perdía en la fabricación de carbón vegetal y que en términos volumétricos se necesitaban 10-24 m^3 de leña para fabricar 1 t de carbón vegetal (figura 4.14). La recompensa era la calidad del combustible: su combustión podía producir una temperatura de 900 °C, y con un suministro de aire suplementario —generalmente mediante el uso de fuelles—, de hasta casi 2.000 °C, más que suficiente para fundir incluso el mineral de hierro (Smil, 2013a).

La recogida de madera como combustible (y como material de construcción y construcción naval) desembocó en una deforestación generalizada. El efecto acumulativo alcanzó niveles preocupantes en regiones anteriormente muy boscosas. A principios del siglo XVIII, el 85% de Massachusetts estaba cubierto de bosque; en 1870, no quedaba más que un 30% (Foster y Aber, 2004). No es extraño que el 6 de marzo de 1855 Henry David Thoreau (1817-1862) escribiera en su *Diario* que

> nuestros bosques están tan maltrechos que la tala de invierno ha sido rápida. Al menos así lo sentimos los caminantes. Apenas quedan reservas importantes de madera, y las que quedan han sido taladas. Han maltratado gravemente la zona de White Pond, en el sur de Fair Haven Pond, han arrasado con los Cliffs, la granja Colburn, Beck Stow, etc. (Thoreau, 1906: 231)

El estudio de sociedades tradicionales que dependieron de los biocombustibles hasta la segunda mitad del siglo XX apunta a una necesidad anual de combustible inferior a 500 kg per cápita en las aldeas más pobres de las regiones tropicales. Se utilizó hasta cinco veces más biomasa en latitudes con inviernos pronunciados y una producción sustancial de ladrillos, vidrio, tejas y metales basada en la madera y la evaporación de salmueras. En Alemania, eran necesarias hasta 2 t de madera (casi toda quemada para obtener potasio en lugar de producir calor) para fabricar 1 kg de vidrio, mientras que la evaporación de salmueras en grandes cacerolas de hierro calentadas con madera consumía hasta 40 kg de madera por 1 kg de sal (Sieferle, 2001).

No existen registros de consumo típico de biocombustible durante la Antigüedad, y solo tenemos unos pocos registros fiables de algunas sociedades medievales. He estimado que el consumo anual de energía en el Imperio romano en torno al 200 a. C. ascendía a 650 kg per cápita, es decir, unos 10 GJ, o 1,8 kg/día (recuadro 4.10). La mejor

estimación disponible del consumo de leña en el Londres medieval (alrededor de 1300) dio como resultado una media anual de 1,75 t de madera, unos 30 GJ per cápita (Galloway, Keene y Murphy, 1996). Estimaciones realizadas para Europa occidental y América del Norte justo antes de su paso al carbón muestran un consumo medio incluso superior.

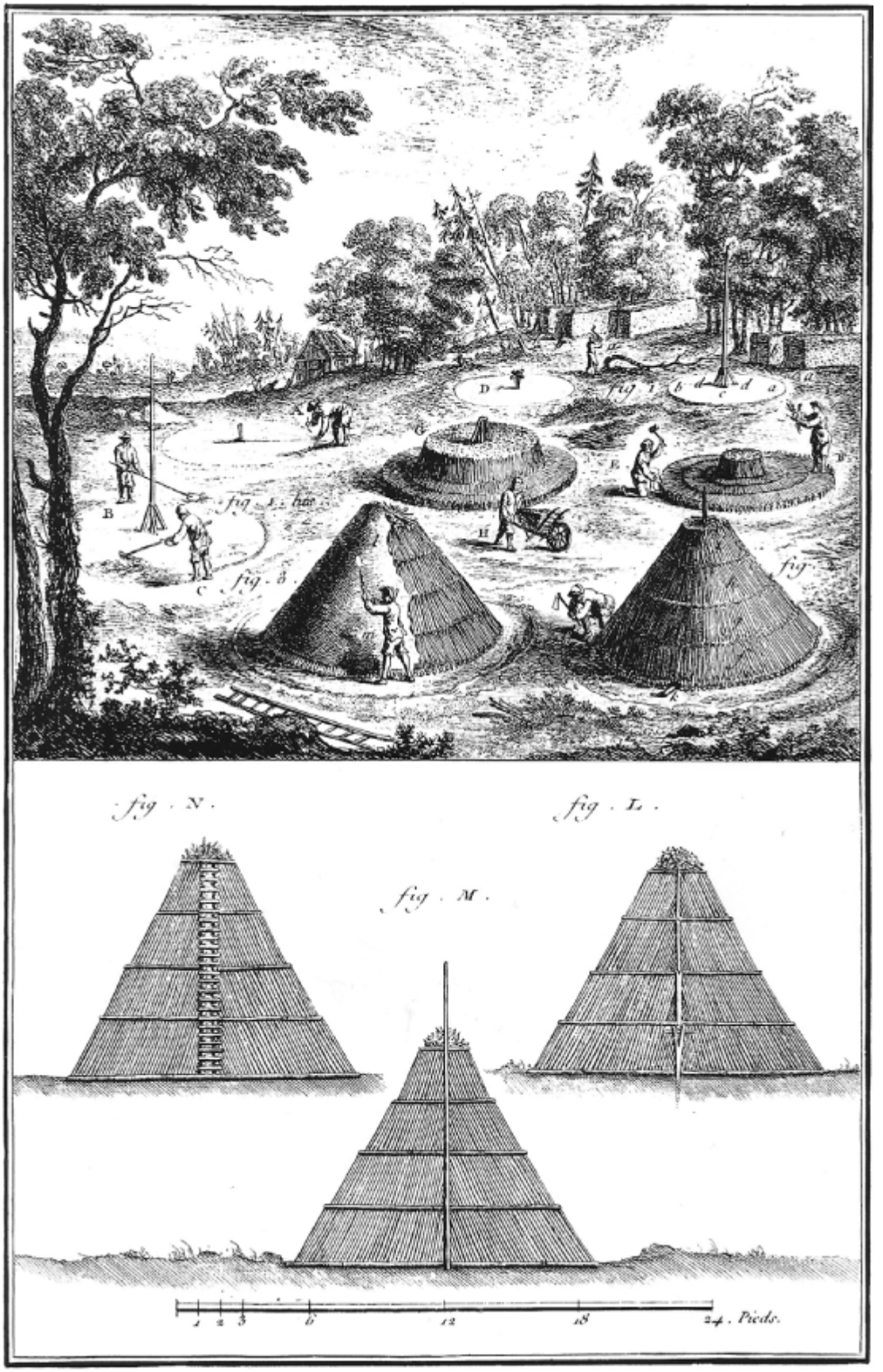


fig. N.
fig. L.
fig. M.
1 2 3 6 12 18 24. Pieds.

Figura 4.14 La producción de carbón vegetal comenzaba con la nivelación del suelo y el establecimiento de un polo central; la madera cortada se apilaba a su alrededor y se cubría con arcilla antes de la ignición. Fuente: *Enciclopedia* (Diderot y D'Alembert, 1769-1772).

Las comunidades de Europa septentrional, Nueva Inglaterra, el Medio Oeste o Canadá que en el siglo XIX calentaban y cocinaban únicamente con leña consumían 3-6 t/año/cápita. Ese mismo era el rango de consumo doméstico alemán durante el siglo XVIII (Sieferle, 2001). La media austriaca en 1830 era de 5 t/año/cápita (Krausmann y Haberl, 2002), igual que la estadounidense hacia 1850 (Schurr y Netschert, 1960). Aunque esta última cifra incluía el creciente consumo industrial (principalmente carbón metalúrgico) y de transporte, en la década de 1850 la combustión doméstica todavía era el principal consumidor de madera estadounidense.

RECUADRO 4.10

El consumo de madera en el Imperio romano

Mi estimación (conservadora) tiene en cuenta las principales categorías de consumo de madera (Smil, 2010c). El pan y los guisos eran el alimento básico de los romanos, y las *pistrinae* y *tabernae* urbanas requerían al menos 1 kg/día/persona de madera. Se necesitaban al menos 500 kg/año de madera para calefacción, indispensable para la tercera parte de la población del Imperio que vivía en clima templado, más allá del cálido Mediterráneo. A esto conviene añadir un consumo medio de 2 kg/año/persona de metal, que requería 60 kg de madera por kg de metal. Esto suma 650 kg/persona (10 GJ, o 1,8 kg/día), pero, como la eficiencia de combustión fue siempre muy baja (<15%), la energía útil derivada de la quema de esa madera era de 1,5 GJ/año, el equivalente de un tanque moderno de gasolina (50 l).

A modo de comparación, cuando Allen (2007) construyó sus dos cestas de consumo doméstico romanas, supuso un consumo medio de 1 kg/día/persona de madera para lo que llamó una cesta respetable, y solo 0,4 kg/persona para una cesta de subsistencia, pero su cálculo excluía el combustible utilizado para la fabricación metalúrgica y artesanal. Y Malanima (2013a) situó el consumo medio de madera per cápita al comienzo del Imperio romano en 4,6-9,2

GJ/año, la mitad del consumo total de energía, dividiéndose la otra mitad en una relación de 2 a 1 entre alimentación y forraje. Su total máximo es de 16,8 GJ/persona, mientras que mi estimación para alimento, forraje y madera es de 18-19 GJ/persona (Smil, 2010c).

Residuos de cultivo y estiércol

Los residuos de cultivo eran combustibles indispensables en las llanuras agrícolas deforestadas y densamente pobladas y en las regiones áridas y escasamente arboladas. La paja y los tallos de cereal solían ser los más abundantes, pero había muchos otros residuos importantes a nivel local y regional, como la paja de legumbres y las enredaderas de tubérculos, los tallos y raíces de algodón, los troncos de yute, las hojas de caña de azúcar y las ramas podadas de los árboles frutales. Algunos residuos de cultivo tenían que ser secados antes de la combustión. La paja madura (*ripe straws*) solo contiene 7-15% de agua y su contenido energético es comparable al de los árboles de hoja caduca (madera dura).

Pero su densidad es obviamente mucho más baja, por lo que almacenar suficiente paja para todo el invierno no era tan fácil como acumular madera talada. La baja densidad de los residuos de cultivo también significaba que los fuegos abiertos y las estufas simples tenían que ser alimentados casi constantemente. Debido a la existencia de otros usos no energéticos alternativos, los residuos de cultivo solían escasear. Los residuos de legumbres eran un excelente alimento y un fertilizante de alto contenido proteico. La paja de cereal es un buen alimento para los rumiantes y una buena cama para los animales; muchas sociedades (como la inglesa o la japonesa) la usaban para fabricar los techos de las casas, y también servía para fabricar herramientas simples y artículos domésticos.

Por tanto, cada pequeño pedazo de fitomasa combustible solía utilizarse para uso doméstico. En todo Oriente Medio se quemaban a menudo arbustos espinosos, y los granos de dátiles se utilizaban para hacer carbón. En la llanura del norte de China las mujeres y los niños

recogían ramas caídas, hojas y hierbas secas con rastrillos, hoces, cestas y bolsas (Rey, 1927). Y en Asia interior, así como en el subcontinente indio, partes de Oriente Medio, África y ambas Américas, el estiércol seco era la fuente de calor más importante para cocinar. El valor calorífico del estiércol secado al aire libre es comparable al de los residuos de cultivo o la hierba (recuadro 4.9).

La contribución clave del estiércol a la conquista del oeste estadounidense es un fenómeno poco conocido (Welsch, 1980). El estiércol de búfalo y ganado silvestre hizo posible las primeras travesías continentales y la posterior colonización de las Grandes Llanuras durante el siglo XIX. Los viajeros de los senderos de Oregón y Mormón recogían «madera de búfalo», y los primeros colonos acumulaban las provisiones para el invierno en forma de iglú o contra las paredes de las casas. Conocida como leña de vaca o roble de Nebraska, el combustible se quemaba de manera uniforme y con poco humo y olor. Su rápida combustión, sin embargo, requería una alimentación casi continua. En América del Sur el estiércol de llama era el principal combustible en el altiplano de los Andes, el núcleo del Imperio inca en el sur de Perú, el este de Bolivia y el norte de Chile y Argentina (Winterhalder, Larsen y Thomas, 1974). En la región del Sahel, así como en las aldeas egipcias, se utilizaba estiércol de ganado y camellos. El estiércol de ganado se utilizaba abundantemente en las regiones áridas y monzónicas de Asia, y los tibetanos siempre dependieron del estiércol de yak. El único estiércol que generalmente se evitaba utilizar era el de oveja, porque su quema produce un humo acre.

En la India, donde el uso del estiércol sigue siendo común en muchas zonas rurales, era habitual recoger excrementos de vaca y búfalo de agua, principalmente para niños y mujeres *harijan* (intocables), tanto para uso doméstico como para la venta (Patwardhan, 1973). El estiércol era (y es) recogido tanto seco como fresco. El estiércol fresco se mezcla con paja, se moldea a mano en pedazos y se seca al sol en filas, se pega en las paredes de las casas o se

apila (figura 4.15). Un estudio reciente sobre el consumo de energía en regiones rurales de Asia meridional reveló que el 75% de los hogares indios, el 50% de los nepaleses y el 47% de los bangladesíes siguen utilizando estiércol para cocinar (Behera *et al*., 2015).

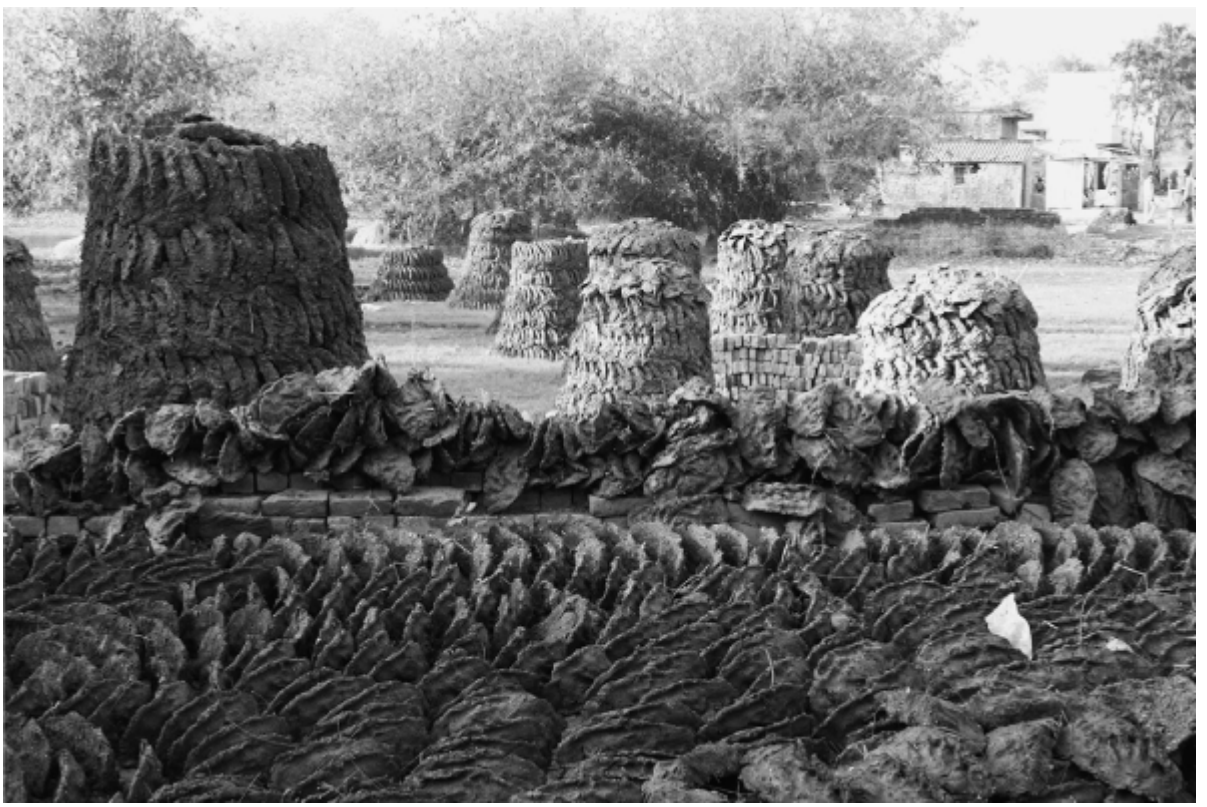


Figura 4.15 Filas y pilas de estiércol de vaca secándose en Varanasi, Uttar Pradesh, India (Corbis).

CONSUMO DOMÉSTICO

Un antiguo proverbio chino ordena en importancia las cosas de las que la gente no podía prescindir en su día a día: leña, arroz, aceite, sal, salsa, vinagre y té. En las sociedades agrícolas tradicionales, donde la mayor parte de la energía alimentaria provenía de los granos, estos tenían que cocerse (al vapor, en el horno o hirviendo) para que las semillas duras fueran comestibles. Pero antes de que los granos pudieran cocinarse tenían que procesarse. La molienda siempre ha

sido una etapa de procesamiento prácticamente universal, e históricamente casi siempre la primera (la extracción de aceites mediante el prensado de semillas, frutas y nueces llegó más tarde). Los tubérculos se procesaban para eliminar los factores antinutritivos o permitir su almacenamiento a largo plazo, y la caña de azúcar se trituraba para exprimir su agua dulce. En todas estas etapas, la energía humana fue complementada gradualmente por el trabajo animal.

Como ya se ha señalado, el consumo de energía inanimada en la molienda —ruedas hidráulicas horizontales que hacen girar pequeñas piedras de molino— tiene 2.000 años de antigüedad.

En Asia oriental, la cocción requería relativamente poca energía de calor para freír y cocer al vapor. En cambio, para hornear el pan (el alimento básico en el resto del Viejo Mundo) y el asado (habitual en Oriente Medio, Europa y África) eran necesarias grandes cantidades de combustible. En algunas sociedades también se consumía combustible para preparar los alimentos de los animales domésticos, sobre todo cerdos. En latitudes medias la calefacción era necesaria, aunque salvo en regiones subárticas las casas solían calentarse durante breves periodos de tiempo y a temperaturas relativamente bajas.

En algunas regiones con escasez de combustible, como las tierras bajas deforestadas al sur del Yangtsé en la China Ming y Qing, no había ningún tipo de calefacción, a pesar del frío en invierno. Pero en las áreas más septentrionales de la región de Jiangnan, también al sur del Yangtsé, en China, la temperatura media en enero y febrero es de 2-4 °C, con mínimos de -10 °C. Y el frío de los interiores tradicionales ingleses, incluso después de la introducción de las estufas de carbón, es proverbial. Por consiguiente, el consumo total de energía doméstica en las sociedades de Asia oriental u Oriente Medio era muy bajo. La demanda de combustible de algunas sociedades del norte de Europa y la América del Norte colonial era bastante alta, aunque la baja eficiencia de combustión daba lugar a proporciones relativamente bajas de calor útil. En consecuencia, incluso en los Estados Unidos del

siglo XIX, dotados de abundante leña, un hogar medio consumía solo una pequeña fracción de la energía útil de que disponía su homólogo del siglo XX.

Preparación de la comida

A la luz del predominio de los cereales en la alimentación de todas las culturas antiguas, la molienda sin duda supuso el requisito de procesamiento más importante de la historia. El grano completo no es muy apetecible, es difícil de digerir y obviamente no puede usarse para hornear. La molienda produce harinas de diversas finuras que podían utilizarse para la preparación de alimentos fácilmente digeribles, sobre todo panes y fideos. La secuencia evolutiva de la molienda comienza con los molinos de mano, piedras ligeramente ahuecadas acompañadas de un mortero. La primera gran innovación fueron los molinos de empuje con tolva y piedras de lecho estriado (*push mills with hoppers and grooved bedstones*). El molino de reloj de arena griego (*Greek hourglass mill*) tenía una tolva y un molinillo cónicos. La productividad del procesamiento manual era muy baja (Moritz, 1958). El trabajo con piedras ahuecadas y morteros no producía más de 2-3 kg/h de harina gruesa. Dos esclavos romanos moliendo harina con una *mola manualis* rotativa (*rotary mola manualis*) (utilizada desde el siglo III a. C.) producían menos de 7 kg/h de harina gruesa. La *mola asinalis* (conocida como molino pompeyano, presente solo en ciudades y pueblos), que era más eficiente, estaba hecha de roca volcánica áspera; la *meta* (elemento fijo cilíndrico inferior) estaba cubierta por el *catillus* (elemento móvil cónico superior), que un burro con arnés y que caminaba en círculos estrechos hacía girar, aunque en lugares confinados solían utilizarse esclavos, que también hacían funcionar máquinas amasadoras en grandes panaderías. En realidad, el alimento básico del Imperio generaba un sufrimiento terrible (recuadro 4.11).

RECUADRO 4.11

Apuleyo (*Las metamorfosis* IX, 12, 3.4), sobre los esclavos de los molinos romanos

«¡Dioses, qué grupo de hombres he visto! Las marcas de látigo cubrían su piel, sus espaldas estaban llenas de cicatrices y de sus vestidos andrajosos no quedaban más que pedazos. Algunos solo llevaban delantales. ¡Estaban todos tan mal vestidos que podía verse su piel debajo de lo que quedaba de sus trapos! Sus frentes estaban marcadas con letras y sus cabezas, medio afeitadas. Tenían hierro en las piernas. Estaban horriblemente pálidos. Sus ojos parecían nublados, doloridos y crudos por el humo de los hornos. ¡Estaban cubiertos de harina, como los atletas con polvo!» (Traducción del autor)

Un molino impulsado por un burro (entrada de energía de 300 W) producía 10-25 kg/h de harina (Forbes, 1965), mientras que las piedras de molino equipadas de una pequeña noria (1,5 kW) molían 80-100 kg/h. La harina se utilizaba para hornear pan, suministrando como mínimo la mitad de toda la energía alimentaria consumida (el pan solía representar más del 70% de la misma). En consecuencia, en 10 h un molino producía harina para 2.500-3.000 personas, es decir, una ciudad medieval de tamaño considerable. Las piedras de molino podían accionarse directamente con ruedas hidráulicas horizontales, aunque todos los molinos de viento y ruedas hidráulicas de gran capacidad requerían engranajes de madera para obtener transmisiones de energía razonablemente eficientes. Por otra parte, ningún molino podía producir harina de calidad sin piedras de molino o muelas bien colocadas y trabajadas, tanto una piedra inferior fija (solera) como una piedra superior móvil (volandera) (Freese, 1957). En el siglo XVIII, las piedras solían tener 1-1,5 m de diámetro y hasta 30 cm de grosor, pesaban cerca de 1 t y giraban 125-150 veces por minuto. El grano se introducía desde la tolva en el agujero central (u ojo) de la volandera, y se trituraba y molía entre la superficie plana de ambas piedras.

Estas grandes piedras tenían que calibrarse con precisión. Si se frotaban entre sí, podían dañarse gravemente o provocar un incendio. Si estaban demasiado separadas, producían harina gruesa en lugar de harina fina. El intervalo de distancia tolerado correspondía al grosor de un papel de estraza grueso en la zona del ojo y un papel de seda en el borde. La harina molida y el salvado se canalizaban hacia fuera a lo largo de surcos. Los artesanos más hábiles usaban herramientas afiladas para profundizar estos surcos. Lo hacían a intervalos regulares determinados por la calidad de la piedra y el ritmo de la molienda, normalmente cada 2-3 semanas. Las opciones de piedra de molino más comunes eran los granitos sólidos y areniscas duras, o pedazos de cuarzo cementados y sujetos por aros de hierro, y ninguno podía hacer un trabajo perfecto en una sola vez. Después de separar el salvado grueso de la harina fina, las partículas intermedias se volvían a moler. El proceso entero podía repetirse varias veces. El tamizado final (empernado) separaba la harina del salvado y las harinas en diferentes calidades o finuras.

Durante siglos, la molienda con agua o viento requirió gran cantidad de trabajo pesado. El grano tenía que ser descargado y elevado e introducido con poleas en la tolva; la harina recién molida tenía que enfriarse con rastrillos, tamizada y embolsada. El tamiz hidráulico fue introducido en el siglo XVI. El ingeniero estadounidense Oliver Evans diseñó el primer molino harinero totalmente automático en 1785: utilizaba cintas con cubos para elevar el grano y tornillos de Arquímedes para transportarlo horizontalmente y esparcir la harina recién molida para su enfriamiento. El invento de Evans no fue un éxito comercial inmediato, pero su libro (autopublicado) sobre la molienda se convirtió en un clásico del género (Evans, 1795).

La historia de la cocina avanzó poco hasta el comienzo de la era industrial. Los fuegos y hornos al aire libre se utilizaban para asar, hervir, freír y guisar. Los braseros se utilizaban para hervir agua y asar a la parrilla y los hornos sencillos de arcilla o piedra para hornear. Se colocaban panes planos a los lados de los hornos de arcilla (que siguen

siendo la única herramienta para cocer un verdadero *naan* indio), mientras que los panes con levadura se colocaban en superficies planas. La escasez de combustible contribuyó a la introducción de métodos de cocción de baja energía. Antes de 1500 a. C. los chinos ya colocaban ollas de cocina sobre tres patas huecas (*li*). Y las sartenes poco profundas y con inclinación —el *kuali* indio y del sudeste asiático y el *kuo* chino, más conocido en Occidente como wok cantonés— se utilizaban para freír, guisar y cocer al vapor (E. N. Anderson, 1988).

La amplia adopción de estufas de cocina —cuyo origen sigue siendo incierto— requirió la construcción de chimeneas. Antes del siglo XV estas últimas eran poco comunes incluso en las regiones más ricas de Europa, pues la mayoría de la población todavía dependía de ineficientes y humeantes fuegos al aire libre (Edgerton, 1961). Muchos hornos chinos de arcilla o ladrillo seguían sin tener chimenea durante las primeras décadas del siglo xx (Hommel, 1937). Los hornos y las estufas de hierro completamente cerrados comenzaron a sustituir a los fuegos abiertos para cocinar y calentar a partir del siglo XVIII. La famosa chimenea de Benjamín Franklin, concebida en 1740, no era un aparato autónomo, sino un horno dentro de una chimenea capaz de cocinar y calentar de manera mucho más eficiente (Cohen, 1990). En 1798, Benjamin Thompson (Conde Rumford, 1753-1814) diseñó una chimenea de ladrillo con aperturas superiores para colocar ollas; inicialmente fue adoptada por las grandes cocinas (Brown, 1999).

Calor y luz

La naturaleza primitiva y la ineficiencia de la calefacción e iluminación tradicionales son especialmente notables cuando se comparan con los a menudo impresionantes inventos mecánicos de las civilizaciones antiguas. El contraste es aún mayor en el contexto de la aceleración de la innovación técnica en la Europa posterior al Renacimiento. Durante buena parte de la era moderna temprana (1500-1800), muchos fuegos abiertos y chimeneas sencillas suministraron calor de manera

inadecuada. El resplandor del fuego y las débiles y parpadeantes llamas de las lámparas de aceite (a menudo muy humeantes) y las velas (generalmente caras) proporcionaron una iluminación deficiente durante miles de años (hasta la era industrial).

En cuanto a la calefacción, la transición obligatoria de fuegos abiertos derrochadores y difícilmente controlables a sistemas más eficientes fue muy lenta. El paso del fuego abierto a la chimenea de tres caras solo mejoró la eficiencia marginalmente. Las chimeneas bien alimentadas podían mantener el fuego sin vigilancia durante la noche, pero su eficiencia térmica era pobre. Las mejores rondaban el 10%, aunque el rendimiento típico era del 5%. Y en realidad las chimeneas en funcionamiento solían causar una pérdida de calor general en la vivienda, al calentar el entorno inmediato con calor irradiado pero empujar al mismo tiempo el aire caliente desde el interior hacia el exterior. Cuando se impedía esta corriente, la combustión podía producir niveles peligrosos —o letales— de monóxido de carbono.

La eficiencia de las estufas tradicionales de ladrillo o arcilla variaba no solo en función del diseño —que solía depender de las preferencias de cocina—, sino también del combustible dominante. La medición moderna de estufas rurales asiáticas, cuyo diseño no ha cambiado desde hace siglos, ha permitido determinar las eficiencias prácticas máximas. Las estufas más grandes de ladrillo, con conductos de humo largos y tapas bien ajustadas y alimentadas con madera talada, tenían una eficiencia de alrededor del 20%, mientras que el rendimiento de estufas más pequeñas, con corriente de aire y conductos de humos cortos y alimentadas con paja o hierba, era del 10-15%. Pero no todos los sistemas de calefacción tradicionales eran tan poco eficientes. Al menos tres sistemas de calefacción espacial utilizaban madera y residuos de cultivo de forma sorprendentemente eficiente y proporcionaban un elevado grado de confort.

Se trata del hipocausto romano, el *ondol* coreano y el *kang* chino. Los dos primeros sistemas conducían gases calientes producidos por la combustión por canalizaciones situadas bajo el suelo de las

habitaciones que tenían que calentarse, antes de evacuarlos a través de una chimenea. El hipocausto fue una invención griega. Los restos más antiguos se encontraron en Grecia y la Magna Grecia, la costa del sur de Italia habitada por los griegos, y data del siglo III a. C. (Ginouvès, 1962); los romanos lo utilizaron primero en las salas calientes (*caldaria*) de los baños públicos (*thermae*) y luego para calentar casas de piedra en las provincias más frías del Imperio (figura 4.16). Pruebas realizadas con un hipocausto conservado muestran que solo 1 kg/h de carbón vegetal mantenía una temperatura de 22 °C en una habitación de 5 × 4 × 3 m con una temperatura exterior de 0 °C (Forbes, 1966). El tercer sistema de calefacción tradicional todavía se utiliza en todo el norte de China. El *kang*, una gran plataforma de ladrillo (de al menos 2 × 2 m y 75 cm de altura) se calienta con el calor residual de una estufa adyacente; sirve como cama de noche y lugar de descanso durante el día (Hommel, 1937).

Yates (2012) llevó a cabo un detallado análisis de ingeniería de esta tradicional estufa de lecho (o intercambiador de calor) y ofreció sugerencias para mejorar su eficiencia. Servían para conducir el calor despacio por áreas relativamente grandes. Por el contrario, los braseros, comunes en casi todo el Viejo Mundo, solo ofrecían fuentes puntuales y limitadas de calor y podían generar altas concentraciones de monóxido de carbono. Los japoneses, grandes explotadores de los inventos chinos y coreanos, no pudieron introducir el *ondol* o el *kang* en sus endebles construcciones de madera. Se basaron en cambio en braseros de carbón (*hibachi*) y calentadores de pies (*kotatsu*). Estos pequeños braseros, dispuestos en el suelo y cubiertos con tela acolchada, se utilizaron hasta bien entrado el siglo XX. Hoy sobreviven en forma de *kotatsu* eléctricos, como calentadores construidos en mesas bajas. E incluso la Cámara de los Comunes británica fue calentada utilizando grandes ollas de carbón hasta 1791.

Figura 4.16 Parte de un hipocausto romano (con el esqueleto de un perro muerto por los gases) expuesto en el Museo Romano de Homburg-Schwarzenacker, en Saarland. Fotografía: Barbara F. McManus.

Los combustibles de biomasa también fueron las principales fuentes de iluminación tradicional. Las soluciones más simples —aunque también las menos eficientes y cómodas— eran el brillo del fuego, las antorchas de madera resinosa y la quema de astillas. Las primeras lámparas de grasa aparecieron en Europa durante el Paleolítico superior (De Beaune y White, 1993). Las velas empezaron a usarse en Oriente Medio después del 800 a. C. Tanto las lámparas de grasa y aceite como las velas ofrecían una iluminación ineficaz, débil y humeante, pero al menos eran fácilmente transportables y de uso seguro. Quemaban una variedad de grasas y ceras animales y vegetales —aceite de oliva, ricino, colza y linaza, aceite de ballena,

sebo de vacuno y cera de abejas— con mechas de papiro, médula de junco, lino o cáñamo. Hasta finales del siglo XVIII la luz artificial en interiores solo existía en forma de vela. Y la iluminación fuerte solo era posible utilizando muchas velas.

Las velas solo convierten en luz el 0,01% de su energía química. El punto brillante de su llama tiene una irradiancia media (potencia incidente por unidad de superficie) solo un 20% más elevada que el cielo despejado. La invención de los fósforos, que data de la China de finales del siglo VI, hizo que encender fuegos y lámparas fuera mucho más fácil que encender yesca. Las primeras cerillas eran palos delgados de madera de pino impregnados de azufre; no llegaron a Europa hasta principios del siglo XVI. Las cerillas modernas, que incorporan fósforo rojo en la superficie de impacto, aparecieron por primera vez en 1844 y se hicieron rápidamente con la mayor parte del mercado (Taylor, 1972). En 1794, Aimé Argand inventó una lámpara que podía ser regulada para obtener la máxima luminosidad utilizando un portamechas, con un suministro de aire central y una pequeña chimenea para evacuar el aire (McCloy, 1952).

Poco después llegó el primer gas de iluminación hecho con carbón. Más allá de las grandes ciudades, durante más de la mitad del siglo XIX decenas de millones de hogares en todo el mundo siguieron creando luz con un exótico biocombustible, el aceite obtenido de la grasa de cachalote. La caza —mal pagada, extenuante y peligrosa— de estos mamíferos gigantes —retratada con maestría en el clásico *Moby Dick*, de Herman Melville (1851)— alcanzó su punto álgido justo antes de 1850 (Francis, 1990). La flota ballenera estadounidense, que era de lejos la más grande del mundo, contaba con más de 700 barcos en 1846. En esa época, cada año pasaban 160.000 barriles de aceite de esperma por los puertos de Nueva Inglaterra (Starbuck, 1878). Poco después, la reducción del número de cachalotes y la competencia del gas de carbón y el queroseno provocaron una rápida disminución de la caza.

La evolución del transporte y la construcción en la era preindustrial muestra una pauta muy irregular de avances y estancamiento e incluso formas de involución. Un barco de vela ordinario de finales del siglo XVIII era muchísimo mejor que el mejor barco de la Antigüedad, tanto en velocidad como en capacidad para navegar mucho más cerca del viento. Del mismo modo, los carruajes bien tapizados (*well-upholstered*) y con buenos muelles y tirados por caballos con arneses eficaces ofrecían un paseo incomparablemente más cómodo que los viajes a caballo o en carros sin muelles. Sin embargo, en esa misma época los caminos no solían ser mucho mejores —y a menudo eran mucho peores— que durante los últimos siglos del Imperio romano, incluso en los países más ricos de Europa. Y las habilidades de los arquitectos que diseñaron el Partenón ateniense o de los albañiles que terminaron el Panteón, en Roma, eran muy parecidas a las de sus sucesores en la construcción de palacios e iglesias durante el barroco tardío. Todo cambió —y de manera bastante rápida— con la aparición de un motor primario y dos materiales de construcción mucho mejores que los anteriores: la máquina de vapor y el hierro y el acero fundido baratos, que revolucionaron el transporte y la construcción.

Transporte terrestre

En las sociedades preindustriales, la inmensa mayoría de desplazamientos de personas se realizaban caminando y corriendo, que son los dos modos naturales de locomoción humana. El coste energético, la velocidad media y la distancia máxima diaria siempre han dependido principalmente de la aptitud física de cada uno y el terreno predominante (Smil, 2008a). Al caminar, el coste de eficiencia aumenta tanto por debajo como por encima de la velocidad óptima de 5-6 km/h. Las superficies irregulares, el barro y la nieve profunda elevan el coste en hasta 25-35%. El esfuerzo que supone caminar

cuesta arriba es una función de la pendiente y la velocidad, y los análisis detallados muestran un aumento casi lineal del consumo de energía en un amplio rango de velocidades y pendientes (Minetti *et al*., 2002).

Correr requiere una potencia de 700-1.400 MW, equivalente a 10-20 veces la tasa metabólica basal. Un hombre de 70 kg corriendo lentamente produce 800 W; la potencia de un maratonista experto corriendo 42,195 km en 2,5 h promedia 1.300 W (Rapoport, 2010); y cuando Usain Bolt estableció el récord mundial de 100 m en 9,58 s, a los pocos segundos de empezar la carrera, y cuando su velocidad era solo la mitad de la máxima, su potencia alcanzó un máximo de 2.619,5 W, es decir, 3,5 caballos de fuerza (Gómez, Marquina y Gómez, 2013). El coste energético de correr para los seres humanos es relativamente alto, aunque como ya se ha señalado anteriormente las personas tenemos una capacidad única de desvincular este coste de la velocidad (Carrier, 1984). Arellano y Kram (2014) mostraron que el aguante del peso corporal y la propulsión hacia delante representan alrededor del 80% del coste total de la carrera, el balanceo de las piernas el 7% y el mantenimiento del balanceo lateral alrededor del 2% —mientras que el balanceo de los brazos reduce el coste total en un 3%.

Los récords de carrera modernos mejoraron constantemente durante el siglo XX (Ryder, Carr y Herget, 1976) y sin duda están muy por encima de los mejores resultados históricos. Con todo, existen muchos ejemplos destacados de carreras de larga distancia en muchas sociedades tradicionales. Por supuesto, la infructuosa carrera de Filípides de Atenas a Esparta justo antes de la batalla de Maratón, en 490 a. C., es el arquetipo de la carrera de resistencia. Filípides cubrió una distancia de 240 km en solo 2 días (suponiendo que pesara 70 kg, su potencia media habría sido de 800 W, más de 1 CV) únicamente para informar de la negativa de los espartanos a colaborar.

La domesticación de los caballos no solo introdujo un nuevo medio de transporte personal, más potente y más rápido, sino que

también estuvo asociado a la difusión de los idiomas indoeuropeos, la metalurgia del bronce y las nuevas formas de guerra (Anthony, 2007). Los caballos fueron montados durante mucho tiempo antes de ser enjaezados por primera vez (el inicio de la equitación ha sido situado en las estepas asiáticas hacia 1500 a. C.). Pero Anthony, Telegin y Brown (1991) llegaron a la conclusión de que pudo haber comenzado mucho antes, alrededor de 4000 a. C., en los pueblos de la cultura de Sredny Stog, en la Ucrania actual.

Estos tres autores basaron su afirmación en pruebas aún no concluyentes sobre la diferencia entre los premolares de los caballos salvajes y domésticos: los animales que fueron embocados muestran fracturas y biselados distintivos en las micrografías de sus dientes. De manera similar, Outram *et al.* (2009) utilizaron las señales de daño por bocado y otros indicios para concluir que la primera domesticación de caballos tuvo lugar en el seno de la cultura Botai, y que algunos de esos animales fueron embridados y tal vez montados. Al paso, los animales embocados no eran más rápidos que los humanos, pero al trote (más de 12 km/h) y al galope (hasta 27 km/h) cubrían fácilmente distancias que habrían requerido un gran esfuerzo humano. Al galope, los caballos tienen una gran ventaja mecánica: su trabajo muscular se reduce a la mitad, almacenando y devolviendo energía en forma de tensión elástica a sus músculos y tendones (Wilson *et al.*, 2001).

Los jinetes experimentados montando un animal en buena forma podían cabalgar 50-60 km/día fácilmente, y cambiando de caballo podían recorrer más de 100 km/día en caso de emergencia. Las distancias más largas que se recorrieron rutinariamente en un día durante la Edad Media fueron las de los jinetes de la red yam de entrega de mensajes, en Mongolia (Marshall, 1993), y en la época moderna, William F. Cody, más conocido como Buffalo Bill (1846-1917), afirmó que, cuando era un joven jinete del Pony Express, después de que su jinete de socorro muriera, cubrió 515 km en 21 h y 40 m usando 21 caballos (Carter, 2000). Minetti (2003) demostró que

las prestaciones típicas de los servicios de larga distancia eran cuidadosamente optimizadas. Los sistemas postales de relevo (*relay postal systems*) preveían una velocidad media de 13-16 km/h y una distancia diaria de 18-25 km/animal para reducir al mínimo el riesgo de daño en los caballos. Este mismo ritmo o rendimiento fue alcanzado por el antiguo servicio persa establecido por Ciro II el Grande entre Susa y Sardes después de 550 a. C., los jinetes de la red yam del siglo XIII y el Overland Pony Express, que funcionó en California antes de la construcción de enlaces telegráficos y ferroviarios.

Montar a caballo siempre ha supuesto un gran desafío físico. Como la parte delantera de un caballo representa 3/5 de su peso corporal, la única manera de que los planos verticales que intersectan el centro de gravedad del jinete y el animal coincidan es que el jinete se siente hacia delante. Pero una posición erguida hacia delante sitúa el centro de gravedad del jinete muy por encima que el del caballo. Esto puede producir una rápida acción de palanca en la espalda del jinete cuando el caballo se mueve hacia delante, salta o se detiene rápidamente. En consecuencia, la posición más eficiente requiere que el jinete coloque su centro de gravedad no solo hacia delante, sino también hacia abajo. La mejor manera de conseguirlo es adoptar la postura del jockey (*crouching* o acurrucado), que no fue fijada de manera definitiva hasta finales del siglo XIX por Federico Caprilli (Thomson, 1987).

Pfau *et al.* (2009) determinaron que los registros de las principales carreras de caballos mejoraron un 7% cuando, hacia 1900, se adoptó por primera vez la postura del jockey. Esta postura aísla al jinete del movimiento de su montura: inevitablemente, el caballo soporta el peso corporal del jinete, pero no tiene que mover al jinete con cada zancada. Mantener esa postura requiere un esfuerzo sustancial, como refleja el impresionante ritmo cardíaco de los jinetes durante las carreras. La posición baja hacia delante, empleada en su versión más exagerada en el salto moderno, difiere radicalmente de los estilos de

montar retratados en esculturas e imágenes históricas. Por razones diversas, los jinetes se colocaban demasiado atrás y hacían extensiones demasiado amplias. Los jinetes de la Antigüedad tenían aún más desventaja porque desconocían los estribos. De hecho, las justas, el combate a caballo y la equitación con armadura solo fueron posibles con la adopción universal de los estribos en la Europa medieval temprana.

La forma más simple de transportar una carga es cargarla (valga la redundancia). Donde no había carreteras, la gente podía hacerlo mejor que los animales: su escasa fuerza de trabajo solía ser más que compensada por la flexibilidad en la carga y descarga, la movilidad en caminos estrechos y la escalada cuesta arriba. Del mismo modo, los caballos solían ser preferibles a las mulas y los burros con alforjas: eran más resistentes, más estables en los senderos estrechos, tenían cascos más duros y necesitaban menos agua. El método más eficiente de transporte consiste en colocar el centro de gravedad de la carga encima del propio centro de gravedad del portador, pero equilibrar una carga no siempre es práctico. Los palos (*poles*) colgados al hombro y los yugos de madera con cargas, cubos o cestas son preferibles al transporte con las manos o en los brazos. Los traslados de larga distancia en terrenos difíciles se realizan mejor con mochilas sujetas por buenas correas a los hombros o la cabeza. Los sherpas nepalíes, que llevan los suministros de las expediciones al Himalaya, son generalmente reconocidos como los mejores porteadores. Pueden trasladar 30-35 kg (cerca de la mitad de su peso corporal) hasta el campamento base, y menos de 20 kg en pendientes más pronunciadas y alturas más elevadas, en las que el aire es más enrarecido.

Como ya se ha señalado, los *saccarii* romanos que llevaban el grano egipcio en el puerto de Ostia de los barcos a las barcazas transportaban sacos de 28 kg en distancias cortas. En la versión ligera de la tradicional silla de sedán china, dos hombres transportaban a un cliente, lo cual representaba una carga de hasta 40 kg por portador. Estas cargas correspondían a unos 2/3 del peso corporal del portador,

y las velocidades de marcha no solían superar los 5 km/h. En términos relativos, las personas eran mejores porteadores que los animales. Las cargas típicas eran solo del 30% del peso de un animal (es decir, generalmente 50-120 kg) en planos y el 25% en colinas. Con ayuda de una rueda, los hombres podían desplazar cargas que superaban con creces su peso corporal. Los picos registrados son de más de 150 kg en carros chinos donde la carga se situaba justo encima del eje de la rueda. La carretilla europea, con su rueda delantera excéntrica, no solía llevar más de 60-100 kg.

El uso masivo de mano de obra humana, apoyado por simples dispositivos mecánicos, permitía realizar tareas sorprendentemente exigentes. Sin duda, las tareas de transporte más difíciles en las sociedades tradicionales eran la entrega de piedras de construcción de gran tamaño o componentes terminados en obras de construcción. Todas las antiguas altas culturas sabían extraer, desplazar y colocar piedras grandes (Heizer, 1966). Unas pocas imágenes antiguas ofrecen ilustraciones de primera mano de cómo se realizaba este trabajo. Ciertamente, la más impresionante está representada en una pintura egipcia ya mencionada de la tumba de Djehutyhotep, en Deir el-Bersha, fechada en 1880 a. C. (Osirisnet, 2015). La escena representa a 166 hombres arrastrando un coloso en un trineo cuyo camino es lubricado por un trabajador que vierte líquido con ayuda de un recipiente (figura 4.17). Considerando que la lubricación reducía la fricción a la mitad, ese trabajo, absolutamente colosal, pudo alcanzar una potencia máxima de más de 30 kW y desplazar una carga de 50 t. Con todo, incluso este tipo de esfuerzo fue ampliamente superado en distintas sociedades preindustriales.

Los constructores incas utilizaban enormes polígonos de piedra irregulares cuyos lados lisos se ajustaban con una precisión asombrosa. Arrastrar una piedra de 140 t —el bloque más pesado de Ollantaytambo, en el sur de Perú— por una rampa de subida requería el trabajo de 2.400 hombres (Protzen, 1993). Este grupo pudo alcanzar un breve pico de potencia de 600 kW. No sabemos nada

sobre la logística de tal empresa. ¿Cómo pudo emplearse la fuerza de más de 2.000 hombres al mismo tiempo? ¿Cómo se dispusieron para encajar en los confines de las estrechas rampas incas (6-8 m)? ¿Y cómo manejaron los habitantes de la antigua Bretaña el gran menhir partido de Er Grah (Niel, 1961), de 340 t, la piedra más grande erigida por una sociedad megalítica europea?

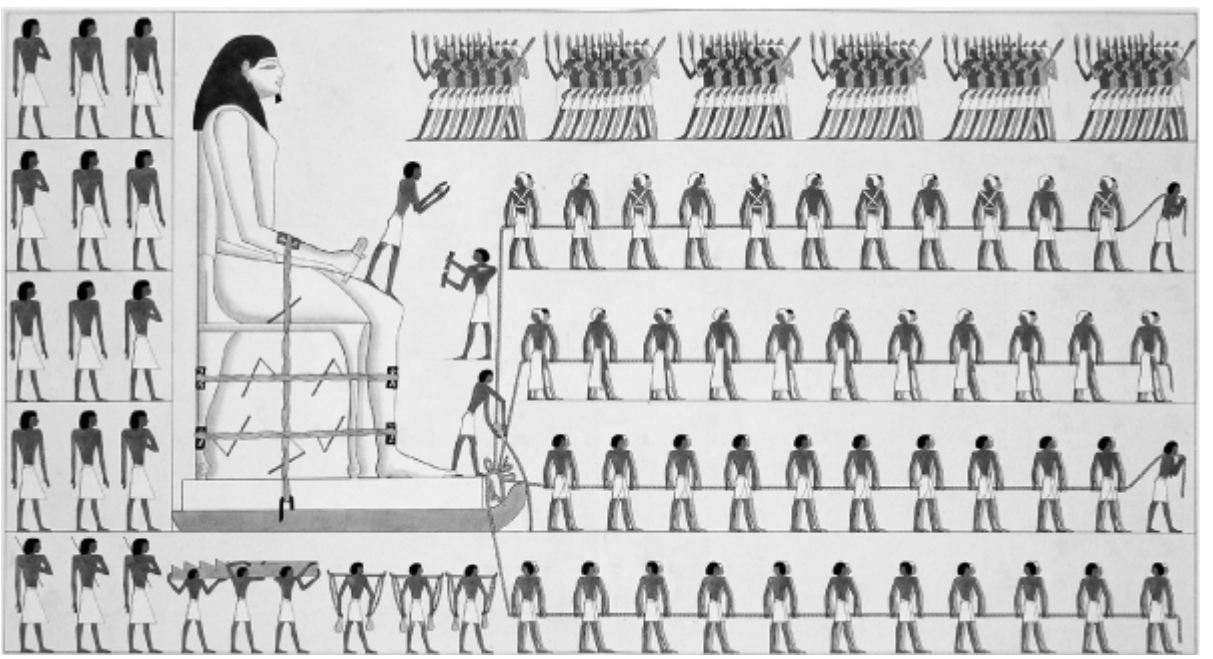


Figura 4.17 Desplazamiento de una enorme estatua de alabastro (6,75 m de altura y más de 50 t) de Djehutyhotep, gran jefe del nomo de la liebre (Osirisnet, 2015). El dibujo reconstruye una pintura mural dañada en la tumba de Djehutyhotep en Deir el-Bersha, Egipto (Corbis).

El rendimiento superior de los caballos solo fue posible con herraduras y arneses eficientes. El rendimiento del transporte terrestre también dependía de la reducción de la fricción y el alcance de velocidades más elevadas. El estado de las carreteras y el diseño de los vehículos eran, pues, factores decisivos. La diferencia en el consumo de energía entre el desplazamiento de una carga por un camino liso, duro y seco y una superficie blanda y con grava es enorme. En el primer caso hay que aplicar una fuerza de solo 30 kg para desplazar una carga de 1 t; en el segundo, es necesario un esfuerzo cinco veces

mayor; y en carreteras arenosas o fangosas el múltiplo puede ser de 7-10. Se utilizaron lubricantes (sebo y aceites vegetales) al menos desde el segundo milenio a. C. En el siglo I a. C., los cojinetes de bronce celtas tenían ranuras internas que contenían rodillos cilíndricos de madera (Dowson, 1973). Es posible que los rodamientos chinos sean todavía más antiguos, pero los rodamientos de bolas (*ball bearings*) solo están documentados de manera certera por primera vez en Europa a principios del siglo XVII.

Antiguamente, las carreteras solían ser pistas blandas que estacionalmente se convertían en caminos fangosos o senderos polvorientos. Los romanos invirtieron gran cantidad de trabajo y organización en una extensa red de caminos de tierra, empezando con la Vía Apia (entre Roma y Capua) en 312 a. C. (Sitwell, 1981).

Las vías romanas mejor construidas eran cubiertas con grava, adoquines o losas de mortero. Durante el reinado de Diocleciano (285-305) el sistema romano de carreteras principales, el *cursus publicus*, ya cubría 85.000 km. El coste energético de esta empresa supuso como mínimo mil millones de días de trabajo a lo largo de siglos de construcción (recuadro 4.12). En Europa occidental, la capacidad de construcción de carreteras de los romanos solo fue superada durante el siglo XIX, y en Europa oriental, durante el siglo XX.

En el mundo musulmán nunca hubo una red de carreteras comparable al *cursus publicus* romano, aunque sí había mucha comunicación (Hill, 1984). Sus extremos estaban conectados por rutas de caravanas muy transitadas que, técnicamente, eran meras pistas. Esto tuvo que ver con que los camellos de carga sustituyeran al transporte sobre ruedas entre Marruecos y Afganistán. Este desarrollo, que precedió a la conquista musulmana, fue impulsado por imperativos económicos (Bulliet, 1975). Los camellos de carga no solo son más potentes y rápidos que los bueyes, sino que también tienen mayor resistencia y longevidad. Pueden transitar terrenos más

accidentados, subsistir con menos forraje y tolerar periodos más largos de escasez de alimento y agua. Estas ventajas económicas se reforzaron con la introducción de la silla de montar del norte de Arabia en algún momento entre 500 y 100 a. C., una excelente solución de monta y transporte que permitió que las caravanas desplazaran carros por toda la región árida del Viejo Mundo antes de la expansión árabe.

RECUADRO 4.12

Coste energético de las calzadas romanas

Si suponemos que una vía romana típica tenía 5 m de ancho y 1 m de profundidad, la construcción de 85.000 km de carreteras troncales habría requerido el uso de 425 Mm^3 de arena, grava, hormigón y piedra y la extracción previa de 800 Mm^3 de tierra y roca para la preparación del lecho de la carretera, los terraplenes y las zanjas. Suponiendo que un trabajador pudiera manejar 1 m^3/día de materiales de construcción, la extracción, el corte, el aplastamiento y el desplazamiento de piedras, la excavación de arena para los cimientos, las zanjas y los lechos de la carretera, la preparación de hormigón y mortero, y la colocación final de los materiales sumarían 1.200 millones de días de trabajo. Incluso en el caso eventual de que el mantenimiento y la reparación de las carreteras hubiera triplicado este esfuerzo, el prorrateo de este total tan impresionante a lo largo de 600 años de construcción resulta en un promedio anual de 6 millones de días de trabajo, el equivalente de 20.000 trabajadores a tiempo completo. Esto representaría una inversión energética anual de casi 12 TJ en concepto de mano de obra (a 2 MJ/persona/día).

Durante la consolidación de su imperio, entre los siglos XIII y XV, los incas construyeron una impresionante red de carreteras con mano de obra cualificada. Cubría 40.000 km, incluidos 25.000 km de carreteras transitables en todo tipo de climas, atravesaba alcantarillas y puentes y estaba equipada con marcadores de distancia. De las dos carreteras reales principales, la que serpenteaba los Andes era de piedra. Su ancho variaba entre 6 m en las terrazas de los ríos (*river*

terraces) y 1,5 m cuando atravesaba roca sólida (Kendall, 1973). La vía costera tenía unos 5 m de ancho. Ninguna de las dos carreteras tenía que soportar ningún vehículo de ruedas, solo caravanas de personas y llamas de carga que transportaban 30-50 kg por animal y recorrían menos de 20 km/día.

Durante las dinastías Qin y Han, los chinos construyeron un extenso sistema de caminos de 40.000 km (Needham *et al*., 1971). El *cursus* romano (contemporáneo del sistema chino) era más extenso —tanto en longitud total como en densidad de carreteras por unidad de superficie— y su construcción más robusta. Así es como describe Estacio (Mozley, 1928: 220) la construcción de la Vía Domiciana en 90 d. C. en sus *Silvas*:

> La primera labor consistió en preparar surcos, delimitar los bordes del camino y excavar el suelo; luego llenar la zanja excavada con otro material y preparar una base para la cresta arqueada del camino, para que el suelo no cediera y un lecho traicionero proporcionara un lugar de descanso dudoso para las piedras sobrecargadas; después, atarlo con bloques colocados cerca de cada lado y cuñas frecuentes. ¡Oh! ¡Cuántas pandillas trabajan juntas! Algunos talan el bosque y despojan las laderas de las montañas, otros bajan vigas y cantos rodados con hierro o unen las piedras y entrelazan el trabajo con arena horneada y toba sucia; otros, a fuerza de trabajo seco, secan las piscinas sedientas y conducen lejos las corrientes menores.

Las carreteras chinas se construyeron apisonando escombros y grava con martillos de metal. Esto proporcionaba una superficie más elástica —pero menos duradera— que las mejores calzadas romanas. El transporte terrestre de mercancías y personas empeoró con el declive de la dinastía Han, aunque un excelente servicio de mensajería logró sobrevivir. En algunas regiones del país, este deterioro fue compensado con creces por el desarrollo de eficientes canales. La

mayoría de mercancías eran transportadas en carretas y carretillas tiradas por bueyes. Hasta bien entrado el siglo XX se trasladaron personas en carros de dos ruedas y sillas de sedán.

Los primeros vehículos de los que hay constancia son de Uruk, alrededor de 3200 a. C. Tenían pesadas ruedas de disco sólido de hasta 1 m de diámetro, construidas con tablas, clavos y mortajas. Su posterior difusión en Europa fue notablemente rápida (Piggottm 1983). Algunas de las primeras ruedas giraban alrededor de un eje fijo; otras giraban con él. Posteriormente surgieron ruedas de radios, mucho más ligeras y de rotación libre (a principios del segundo milenio a. C.), así como un eje delantero pivotante en vehículos de cuatro ruedas que posibilitaba los giros bruscos.

Cuando estaban mal equipados y utilizaban carreteras en mal estado, los caballos eran lentos incluso tirando de cargas relativamente ligeras. Las especificaciones de las calzadas romanas del siglo IV fijaban una carga máxima de 326 kg para carros tirados por caballos y 490 kg para carruajes tirados por bueyes más lentos (Hyland, 1990). La poca velocidad de este método de transporte limitaba su alcance a 50-70 km/día para carros de pasajeros tirados por caballos en buenas carreteras, 30-40 km/día para carros tirados por caballos pero más pesados, y la mitad de esa distancia para bueyes. Los hombres con carretillas recorrían 10-15 km/día. Por supuesto, algunos mensajeros con caballos rápidos cubrían distancias mucho más largas. El máximo del que tenemos constancia es de 380 km/día. La poca velocidad y capacidad de transporte terrestre se tradujo en un coste elevado, como lo ilustra el Edicto sobre Precios Máximos de Diocleciano. En 301 d. C. costaba más que el grano recorriera 120 km por carretera que enviarlo en barco desde Egipto a Ostia, el puerto de Roma. Y después de que el grano egipcio llegará a Ostia, a 20 km de Roma, era cargado de nuevo en barcazas y transportado contracorriente por el Tíber, en lugar de ser transportado por carros tirados por bueyes.

Este tipo de dificultad persistió en la mayoría de sociedades hasta bien entrado el siglo XVIII. Durante mucho tiempo fue más barato

importar muchos bienes a Inglaterra por mar desde Europa que llevarlos en animales de carga desde el interior del país. Según el testimonio de distintos viajeros, el estado de los caminos ingleses era «execrable», «abominable» e «infernal» (Savage, 1959). La lluvia y la nieve hacían que los caminos de grava o tierra blanda mal mantenidos fueran intransitables; en muchos casos, el camino era tan estrecho que solo permitía el tráfico de vehículos de carga. Las carreteras de Europa continental estaban en un estado parecido, y los caballos de carroza, organizados en equipos de 4-6, duraban de media menos de tres años. No se introdujeron mejoras decisivas hasta después de 1750 (Ville, 1990). Inicialmente consistieron en el ensanchamiento y mejor drenaje de los caminos y más adelante su revestimiento con acabados más duraderos (grava, asfalto o cemento). Los caballos pesados europeos pudieron demostrar entonces su gran utilidad para el transporte: a mediados del siglo XIX, la carga máxima permitida en Francia alcanzaba casi 1,4 t, unas cuatro veces el límite romano.

En el transporte urbano, los caballos también alcanzaron su máxima importancia durante la era del ferrocarril, entre la década de 1820 y el final del siglo XIX (Dent, 1974). Mientras que el ferrocarril se hacía cargo de los envíos y viajes de larga distancia, el transporte de mercancías y personas a caballo era dominante en todas las ciudades en crecimiento de Europa y América del Norte. Curiosamente, la máquina de vapor aumentó el uso de caballos de tiro (Greene, 2008). Muchos envíos realizados mediante ferrocarril tenían que ser recogidos y distribuidos por furgonetas, vagones y carros tirados por caballos. Estos vehículos también transportaban alimentos y materias primas del campo a la ciudad. Además, y como ya hemos dicho anteriormente, la mayor afluencia urbana trajo consigo el uso masivo de coches de alquiler o *hansoms*, ómnibus y carros de reparto, todos tirados por caballos (figura 4.18).

La estabulación de los animales en caballerizas y el suministro y almacenamiento de heno y paja consumió muchísimo espacio urbano (McShane y Tarr, 2007). Al final del periodo victoriano había 300.000

caballos en Londres. Los urbanistas de Nueva York pensaron en reservar un cinturón suburbano de pasto para acomodar grandes grupos de caballos durante las horas de menor demanda. El coste energético directo e indirecto del transporte urbano a caballo —cultivo de grano y heno, alimentación, estabulado, aseo, herrado, conducción y gestión de desechos— era una de las partidas más importantes del balance energético de las ciudades de finales del siglo XIX. Con todo, el dominio equino terminó de forma bastante abrupta. La electricidad y los motores de combustión interna se hicieron viables a medida que el número de caballos urbanos aumentaba, hasta alcanzar cifras récord durante la década de 1890. En menos de una generación, el tráfico urbano equino fue sustituido en buena medida por tranvías eléctricos, automóviles y autobuses.

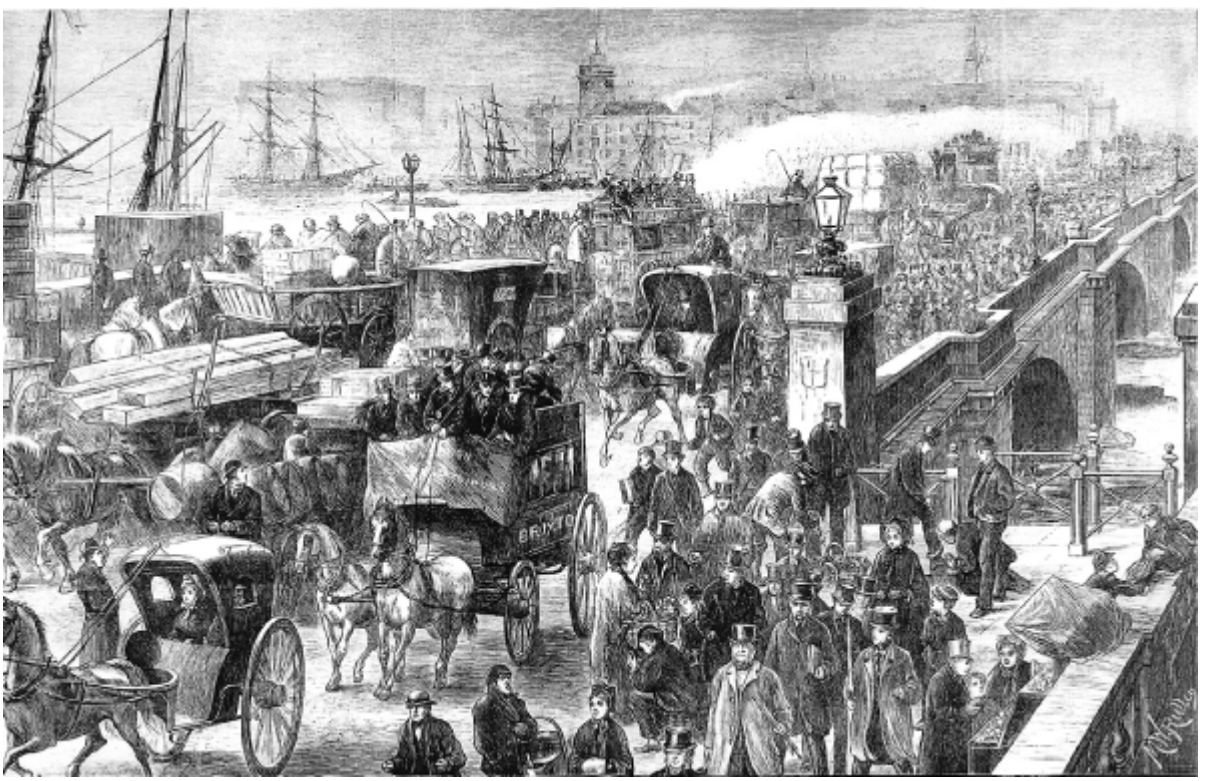


Figura 4.18 El grabado aparecido en *Illustrated London News* el 16 de noviembre de 1972 capta perfectamente la alta densidad de tráfico equino en las ciudades de Europa de finales del siglo XIX, en plena industrialización.

Curiosamente, en esa misma época los mecánicos europeos y estadounidenses llegaron a una versión práctica del vehículo locomotor más eficiente impulsado por el hombre, la bicicleta moderna. Durante generaciones la bicicleta fue un aparato torpe y peligroso y, por tanto, no fue adoptada en masa como vehículo de transporte personal conveniente. Esto cambió en la década de 1880, cuando John Kemp Starley y William Sutton introdujeron una bicicleta con ruedas de igual tamaño, dirección directa y un marco de acero tubular en forma de diamante (Herlihy, 2004; Wilson, 2004; Hadland y Lessing, 2014), diseño que ha permanecido estable hasta hoy (figura 4.19). En buena medida, la evolución de la bicicleta moderna termina en 1889 con la adición de neumáticos y un freno de pedal trasero.

La bicicleta mejorada —con luces, varios sistemas de carga y asientos en tándem— se hizo común para trabajar, comprar o pasear en muchos países de Europa, especialmente los Países Bajos y Dinamarca. La posterior difusión de la bicicleta en otras regiones más pobres fue todavía más importante. La historia de la China comunista estuvo muy vinculada con el uso masivo de la bicicleta. Hasta la década de 1980 no hubo automóviles privados en China y hasta el final de la década de 1990 muchísima gente utilizó la bicicleta incluso en las grandes ciudades del país. El posterior desarrollo del metro en las grandes ciudades y el crecimiento de la venta de automóviles redujo el uso urbano de la bicicleta (reducción que solo ha sido parcialmente compensada por la aparición de la bicicleta eléctrica), pero la demanda rural sigue siendo fuerte y China sigue siendo el mayor productor mundial de bicicletas, con más de 80 millones de unidades al año, de las cuales exporta más del 60% (IBIS World, 2015).

Barcos de remos y veleros

El transporte marítimo alcanzó niveles de potencia muy superiores al terrestre. Las embarcaciones de remos fueron ingeniosamente

diseñadas para combinar el esfuerzo de decenas y cientos de remeros. Naturalmente, el uso prolongado de los remos era agotador y requería mucho trabajo, y cuando se hacía en un espacio confinado, bajo la cubierta, era verdaderamente extenuante. En otras palabras, la admiración que podamos sentir por la complejidad del diseño y la organización de los grandes barcos de remos no debe hacernos olvidar el enorme sufrimiento humano que supuso. Los barcos de remos de la antigua Grecia han sido especialmente bien estudiados (Anderson, 1962; Morrison y Gardiner, 1995; Morrison, Coates y Rankov, 2000). Los barcos que llevaron a las tropas griegas a Troya —pentecónteros de cincuenta remeros— pudieron alcanzar breves picos de potencia útil de 7 kW.

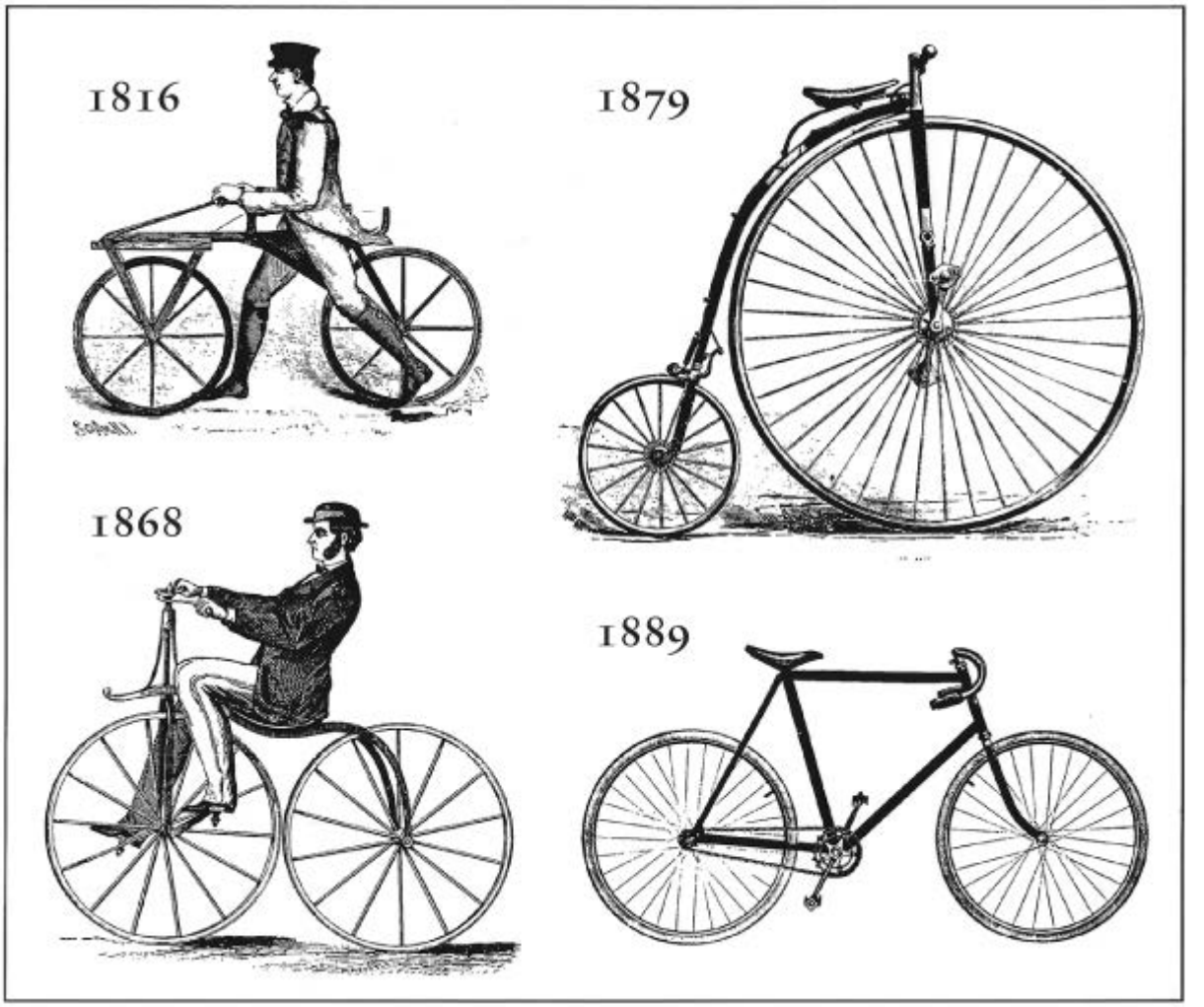


Figura 4.19 El desarrollo de la bicicleta es sorprendentemente tardío y lento. La torpe draisiana, diseñada por el barón de Drais en 1816, obligaba al ciclista a empujarse a sí mismo. En 1855 se añadieron pedales al eje de la rueda motriz por primera vez, innovación que condujo al desarrollo del velocípedo durante la década de 1860. La posterior regresión del diseño condujo a la aparición de enormes ruedas delanteras y muchos accidentes. Por fin, a finales de la década de 1880 apareció la bicicleta moderna: simple, segura y eficiente. Adaptado de Byrn (1900).

El trirreme griego o romano —el mejor buque de guerra de la era clásica— utilizaba 170 remeros (figura 4.20). Los remeros más fuertes podían generar más de 20 kW de potencia, suficiente para producir una velocidad máxima de casi 20 km/h. Incluso cuando alcanzaba una velocidad máxima de 10-15 km/h (más habitual), el trirreme era una máquina de combate muy poderosa y maniobrable. Su ariete de

bronce podía perforar el casco de las naves enemigas y provocar un efecto devastador. Así es como los trirremes decidieron una de las batallas decisivas de la historia de Occidente, la derrota de una gran flota persa a manos de una fuerza griega más pequeña en Salamina, en 480 a. C. Los trirremes también fueron los buques de guerra más importantes de la Roma republicana. En la década de 1980 se llevó a cabo una reconstrucción completa de un trirreme a gran escala (Morrison y Coates, 1986; Morrison, Coates y Rankov, 2000).

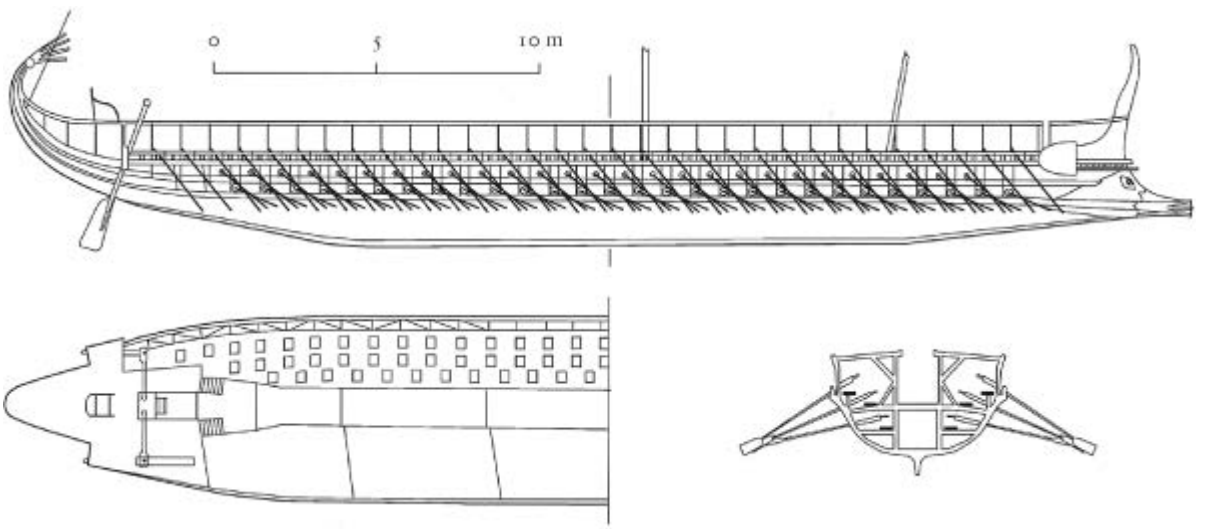


Figura 4.20 Vista lateral, plano parcial y sección transversal de la reconstrucción del trirreme griego *Olympias*. Seis filas dispuestas en forma de V acomodan a 170 remeros. Los remos superiores tienen estabilizadores exteriores. Fuente: Coates (1989).

Las naves todavía más grandes —cuadrirremes, quinquerremes y así sucesivamente— se desarrollaron rápidamente después de la muerte de Alejandro, en 323 a. C. Como no hay indicios de que ninguna de estas naves tuviera más de tres niveles, dos o más hombres presumiblemente impulsaban un solo remo. El final de esta progresión se alcanzó con la construcción de *tessarakonteres* durante el reinado de Ptolomeo IV Filopátor (222-204 a. C.): con 126 m de eslora, más de 4.000 remeros y 3.000 soldados, en teoría podía alcanzar más de 5 MW de potencia. Sin embargo, su peso —incluyendo las catapultas,

muy pesadas— lo hacía virtualmente inamovible. Un craso error de cálculo en la construcción.

En el Mediterráneo, las grandes embarcaciones con remos siguieron siendo importantes hasta bien entrado el siglo XVII. En esa época, las grandes galeras venecianas contaban con 56 remos, cada uno de ellos manipulado por 5 hombres (Bamford, 1974; Capulli, 2003). Las grandes piraguas maoríes requerían casi tantos hombres (hasta 200). El límite general de la potencia humana agregada aplicada al remo sostenido, por tanto, era de 12-20 kW. También existían barcos de pedaleo y cintas de correr. Durante la dinastía Song, los chinos construyeron buques de guerra con una rueda de paletas cada vez más grandes, en los que hasta 200 hombres podían pisar los pedales (Needham, 1965). En Europa, a mediados del siglo XVI aparecieron remolcadores más pequeños impulsados por 40 hombres que hacían girar cabrestantes o bandas sin fin (cintas de correr). La energía animada también fue el principal motor para el transporte de mercancías y personas en barcos y barcazas de canal (recuadro 4.13).

Los canales fueron catalizadores particularmente importantes del desarrollo económico en la zona central de China (en la cuenca inferior del Huang He y la llanura del norte) a partir de la dinastía Han (Needham *et al*., 1971; Davids, 2006). La más larga y famosa de estas arterias de transporte es, con mucho, el Gran Canal de China. Su primera sección se abrió a principios del siglo VII y su finalización en 1327 permitió trasladar barcazas de Hangzhou a Pekín, una diferencia de latitud de 10° y una distancia real de 1.800 km. Los primeros canales utilizaban incómodas dobles gradas en las que los bueyes transportaban las embarcaciones al nivel superior. La invención de la esclusa de canal en 983 permitió elevar barcos de forma segura y sin desperdicio de agua. Un conjunto de esclusas elevaba el Gran Canal hasta más de 40 m sobre el nivel del mar. Los barcos eran arrastrados por grupos de trabajadores, bueyes o búfalos de agua.

En Europa, los canales alcanzaron su esplendor durante los siglos XVIII y XIX. Los caballos o mulas que se desplazaban por los caminos de remolque adyacentes tiraban de las naves a una velocidad de 3 km/h cuando estaban cargadas y hasta 5 km/h cuando estaban vacías. Las ventajas mecánicas de este modo de transporte son obvias. En un canal bien diseñado, un caballo pesado podía tirar de una carga de 30-50 t, un orden de magnitud más de lo que hubiera podido manejar en la mejor carretera pavimentada de la época. Las máquinas de vapor reemplazaron gradualmente a los animales de remolque de barcazas, pero a finales del siglo XIX muchos caballos aún trabajaban en canales más pequeños.

RECUADRO 4.13

Transporte por canal en las sociedades tradicionales

La primera descripción del transporte por canal aparece en las *Sátiras* de Horacio (Quinto Horacio Flaco, 65-8 a. C.) (Buckley, 1855: 160):

> El marinero y un pasajero, empapados en abundante vino espeso, compiten entre sí cantando las alabanzas de sus amantes ausentes. Al final el pasajero, fatigado, se pone a dormir, mientras el marinero, perezoso, amarra a una piedra el ronzal de la mula, la deja pastar y ronca panza arriba. Y ya llegaba el día, cuando vimos que la barca no avanzaba; hasta que un pasajero, un tipo colérico, salta y golpea la cabeza y los costados de la mula y el marinero con una vara de sauce. Y al fin llegamos a tierra, a la hora cuarta.

La construcción de canales de transporte en Europa, una importación inconfundible de China, comenzó en el norte de Italia durante el siglo XVI. El canal del Mediodía francés (*canal du Midi*), de 240 km de longitud, fue terminado en 1681. Los enlaces continentales y británicos más largos llegaron después de 1750, y el sistema de canales alemán realmente fue posterior a los ferrocarriles (Ville, 1990).

Las barcas de canal desplazaban grandes cantidades de materias primas y productos básicos de importación para el crecimiento de las ciudades y la expansión de la industria, y también servían para evacuar sus desechos. Manejaron gran parte del tráfico de mercancías en Europa justo antes de la introducción de los ferrocarriles y durante unas pocas décadas después (Hadfield, 1969).

A diferencia del transporte por canal y los buques de guerra, el transporte marítimo de larga distancia de mercancías y personas siempre estuvo dominado por embarcaciones de vela, cuya historia puede ser resumida como la búsqueda de la mejor conversión posible de la energía cinética del viento en movimiento. Por sí solas las velas no eran suficientes, aunque obviamente eran la clave del éxito. Básicamente, las velas son aeroplanos de tela (al inflarse con el viento adoptan una forma de lámina) diseñados para maximizar la fuerza de elevación y minimizar la resistencia (recuadro 4.14). La fuerza de la vela debe combinarse con la fuerza de equilibrio de la quilla para que la embarcación no vaya a la deriva a favor del viento (Anderson, 2003).

Las velas cuadradas colocadas en ángulo recto en el eje largo del barco eran eficientes convertidores de energía solo cuando había viento de popa. Los barcos romanos empujados por vientos noroccidentales podían ir de Mesina a Alejandría en solo 6-8 días. Sin embargo, la vuelta requería 40-70 días. La navegación irregular, la sustancial variabilidad estacional y el cese de todos los viajes en invierno (el transporte marítimo entre España e Italia estaba cerrado entre noviembre y abril) hacen que resulte casi imposible determinar velocidades típicas (Duncan-Jones, 1990). Los viajes largos contra el viento resultaban principalmente de largos cambios de rumbo. Todos los barcos antiguos estaban equipados con velas cuadradas, y pasó mucho tiempo antes de la introducción y la amplia difusión de diseños radicalmente diferentes (figura 4.21).

Los barcos con aparejo proa-popa tenían velas alineadas con el eje largo del barco, y sus mástiles eran pivotes que permitían que las velas

giraran y atraparan el viento. La manera más sencilla que tenían de cambiar de dirección era girar hacia el viento y seguir un curso en zigzag. El primer aparejo proa-popa probablemente proviniera del sudeste asiático y fuera una vela rectangular en forma de canasta. Con el tiempo, variantes de este antiguo diseño fueron adoptadas tanto en China como, a través de India, en Europa. Las velas chinas de junco reforzadas se usaron desde el siglo II a. C. La vela cuadrada a palo seco (*canted square sail*) se hizo común en el océano Índico durante el siglo III a. C., y fue una clara precursora de la vela triangular (o latina), tan típica del mundo árabe después del siglo VII.

RECUADRO 4.14

Velas y ceñida (navegación cerca del viento)

Cuando el viento golpea una vela, la diferencia de presión genera dos fuerzas: la elevación, cuya dirección es perpendicular a la vela, y la resistencia, que actúa a lo largo de esta. Con viento de popa, la fuerza de elevación será mucho mayor que la de resistencia y la embarcación avanzará deprisa. Con viento de través (o navegando a un descuartelar), la fuerza que empuja el barco de lado es más fuerte que la que lo impulsa hacia delante. Si el barco tratara de ceñirse, la resistencia superaría la elevación y el barco sería empujado hacia atrás. La capacidad de ceñida ha progresado más de 100° desde los inicios de la navegación. Los primeros barcos egipcios de vela cuadrada solo podían navegar con un ángulo de 1,5°, mientras que las velas cuadras medievales podían avanzar lentamente con viento de través (90°) y sus sucesores, después del Renacimiento, con un ángulo de solo 80° hacia el viento. Más adelante, el uso de velas asimétricas montadas en la línea del eje largo del barco y capaces de girar alrededor de sus mástiles hizo posible la navegación ceñida.

Los barcos con velas cuadradas y mesanas triangulares podían alcanzar los 60° y los aparejos proa-popa (incluyendo velas triangulares, al tercio, tarquina y cangreja) podían acercarse hasta 45° al viento. Los yates modernos se acercan mucho a los 30° (el máximo aerodinámico). La única forma de sortear los límites descritos anteriormente era proceder bajo el mejor ángulo manejable y cambiar de rumbo regularmente. Los barcos de aparejo cuadrado tenían que recurrir al desgaste (*wearing*) o efectuar un giro completo a favor

del viento. Los barcos con velas de proa y popa utilizaban la virada, girando su proa hacia el viento y atrapándolo de nuevo en el lado opuesto de la vela.

La expansión vikinga, que alcanzó Groenlandia y Terranova, fue posible gracias al despliegue de un gran número de enormes velas de lana rectangulares o cuadradas. La producción de estas grandes velas requería mucha mano de obra (la producción de una vela de una capa de 90 m^2 requería cinco años de trabajo de un artesano, utilizando la urdimbre vertical y la trama horizontal). La conversión de tierra en pasto y el mantenimiento de extensos rebaños de ovejas para producir lana suficiente para las grandes flotas nórdicas se sostenía probablemente en mano de obra esclava (Lawler, 2016). Una vez finalizadas las travesías vikingas, se utilizaron grandes velas de lana en el Atlántico nororiental (entre Islandia y Escandinavia, incluidas las islas Hébridas y Shetland) hasta el siglo XIX (Vikingeskibs Museet, 2016).

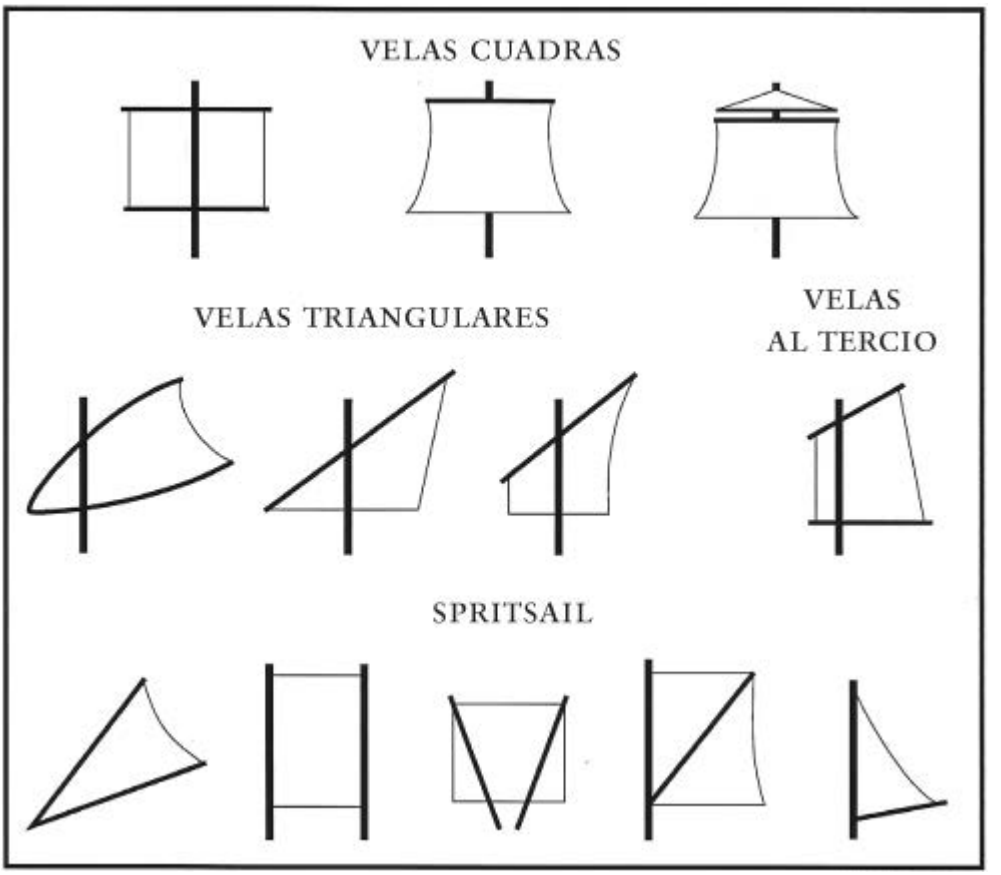


Figura 4.21 Principales tipos de velas. Las velas cuadras (o cuadradas), rectas (a) o acampanadas (b), son las más antiguas. Las velas triangulares incluyen la barra del Pacífico (*Pacific boom*) (d), la latina (e) y la cangreja (f). Las velas al tercio (h) eran comunes en Polinesia, Melanesia (i), el océano Índico (j) y Europa (k, l). Los mástiles y todas las estructuras de soporte se dibujan con líneas más gruesas, y las velas no se muestran a escala. Fuentes: Needham *et al*. (1971) y White (1984).

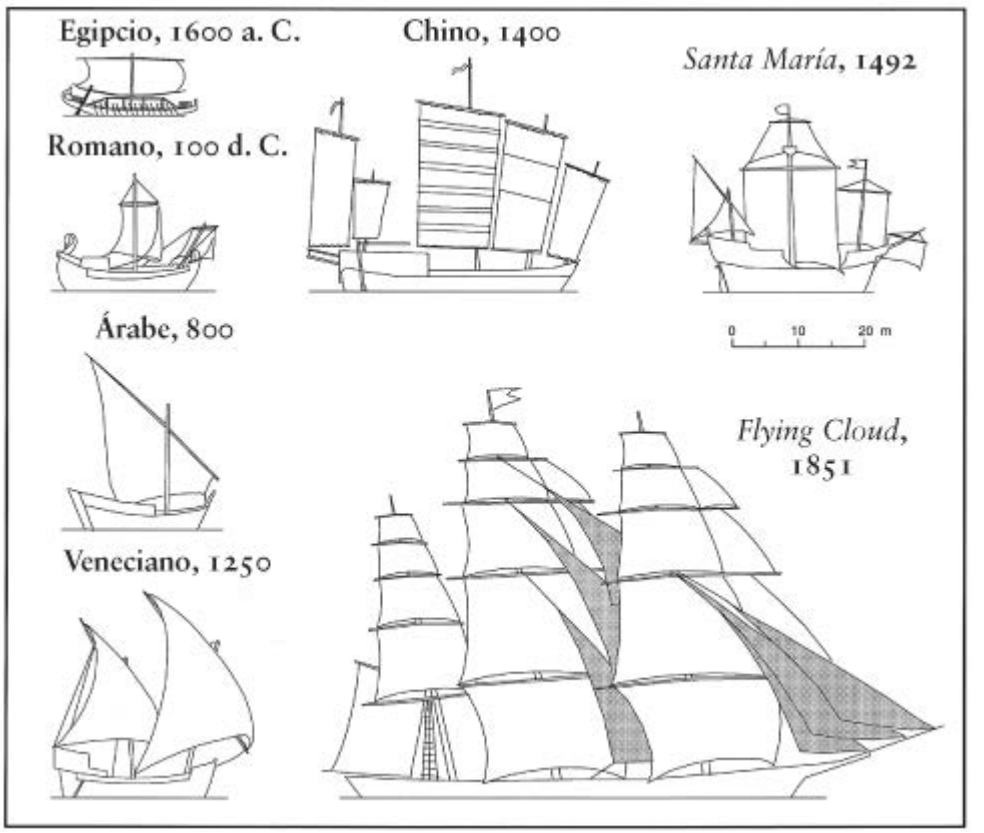


Figura 4.22 Evolución de los barcos de vela. Las sociedades mediterráneas antiguas usaban velas de aparejo cuadrado. Antes de que fueran adoptadas por los europeos, las velas triangulares eran dominantes en el océano Índico. El gran junco de Jiangsu simboliza la eficiencia del diseño chino. La Santa María de Colón tenía velas cuadradas, una vela de proa, una vela latina en la mesana y una vela al tercio bajo el bauprés. El Flying Cloud, un famoso clíper estadounidense de mediados del siglo XIX que batió récords, estaba equipado con foques triangulares en la proa, una vela de popa y velas reales. Los esquemas simplificados se basan en imágenes de Armstrong (1969), Daumas (1969) y Needham *et al.* (1971) y están a escala.

En Europa, la ceñida solo fue posible gracias a la tardía combinación medieval de aparejos cuadrados y velas triangulares. Gradualmente, los barcos fueron aparejados con un mayor número de velas más altas y mejor ajustables (figura 4.22). El mejor y más profundo diseño del casco, el timón de popa (utilizado en China desde el siglo I d. C. y en Europa mil años más tarde) y la brújula magnética (desde 850 en China y en 1200 en Europa) hicieron que los barcos se transformaran en convertidores de energía eólica excepcionalmente

eficientes. Con la adición de precisos cañones pesados, la combinación se volvió irresistiblemente poderosa. La artillería naval, desarrollada en Europa occidental durante los siglos XIV y XV, inició una era de expansión global sin precedentes. Según Cipolla (1965: 137), la nave era esencialmente un dispositivo compacto que permitía que una tripulación relativamente pequeña controlara cantidades de energía inanimada sin precedentes tanto para el desplazamiento como para la destrucción. Tal fue el secreto del repentino y rápido progreso europeo.

Estos barcos alcanzaron su mayor tamaño y se equiparon con un número cada vez mayor de cañones a finales del siglo XVI-II y principios del siglo XIX. La rivalidad naval franco-británica desembocó en una clara supremacía marítima británica, pero el diseño de velero de guerra dominante previa aparición de los barcos de vapor era francés: se trataba de un gran acorazado de dos cubiertas, con una cubierta de cañones de 54 m de largo, 74 cañones y una tripulación de 750 hombres. La Marina Real Británica encargó finalmente casi 150 buques así (Watts, 1905; Curtis, 1919), asegurando el dominio naval del país antes y después de la era napoleónica. A partir de principios del siglo XV, los antecesores (más sencillos) de este innovador diseño permitieron a los audaces marineros portugueses realizar viajes más largos (recuadro 4.15).

En 1492, tres naves españolas capitaneadas por Cristóbal Colón (1451-1506) cruzaron el Atlántico hasta América. En 1519 Fernando de Magallanes (1480-1521) atravesó el Pacífico, y después de su muerte en Filipinas su Victoria fue capitaneada por Juan Sebastián Elcano (1476-1526), que realizó la primera circunnavegación del mundo. Los abundantes registros históricos nos permiten dibujar el progreso en tonelaje y velocidad de los veleros ordinarios y los mejores veleros utilizados durante la expansión colonial y para el creciente comercio marítimo (Chatterton, 1914; Anderson, 1926; Cipolla, 1965; Morton, 1975; Casson, 1994; Gardiner, 2000). Aunque

los romanos construyeron barcos con más de 1.000 t de capacidad, sus buques de carga estándar transportaban menos de 100 t.

Más de mil años después, las exploraciones de los europeos se hicieron con buques casi tan pequeños. En 1492, la Santa María de Colón tenía una capacidad de carga de 165 t, y el Trinidad, el barco de Magallanes, de 85 t. Un siglo después, los barcos de la Armada Invencible (que zarparon en 1599) tenían una capacidad media de 515 t. En 1800, los barcos británicos de la flota india tenían capacidades de 1.200 t. Y mientras que los cargueros romanos no podían exceder una velocidad de 2-2,5 m/s, los mejores clípers de mediados del siglo XIX superaban los 9 m/s. En 1853, el Rayo (Lightning), construido en Boston y con tripulación británica, registró el récord de distancia diaria de un velero: 803 km, o 9,3 m/s (Wood, 1922). Y en 1890 el Cutty Sark, probablemente el clíper dedicado al comercio de té más famoso del mundo, recorrió 6.000 km en 13 días consecutivos a una velocidad media de 5,3 m/s (Armstrong, 1969).

RECUADRO 4.15

Los viajes de exploración de los portugueses

Los marineros portugueses avanzaron primero hacia el sur, a lo largo de la costa occidental de África: llegaron a la desembocadura del río Senegal en 1444, cruzaron el ecuador en 1472 y avistaron la actual Angola en 1486. En 1497 Vasco da Gama (1460-1524) rodeó el cabo de Buena Esperanza y cruzó el océano Índico hasta la India (Boxer, 1969; Newitt, 2005). Luís de Camões (1525-1580), en su gran poema épico *Los lusiadas*, publicado en 1572, captó su progreso:

> Ya por el ancho Océano navegaban,
> Las inconstantes ondas dividiendo:
> Los vientos blandamente respiraban,
> De las naos la hueca lona hinchando:
> Blanca espuma los mares levantaban,
> Que las tajantes proras van rompiendo

Por la vasta marina, donde cuenta
Proteo su manada turbulenta;

Habría que hacer demasiadas suposiciones cuestionables para calcular el consumo energético de un viaje largo en barco o de la flota mercante o militar de alguna nación. Según Unger (1984), el consumo energético de los barcos de vela durante la Edad de Oro de los Países Bajos fue equivalente a la producción energética de los molinos de viento del país, que a su vez representaba menos del 5% de su gigantesco consumo de turba (recuadro 4.16). Aunque resulta difícil cuantificar el consumo energético agregado de la navegación, no hay duda de que su desarrollo —que fue anterior a la expansión de la economía en su conjunto— y su creciente productividad contribuyeron de manera decisiva al crecimiento económico europeo entre 1350 y 1850 (Lucassen y Unger, 2011).

RECUADRO 4.16

Contribución de los barcos de vela al consumo energético de los Países Bajos

No podemos calcular el consumo energético de un barco de vela durante un viaje largo, o el consumo anual agregado de energía eólica útil de una flota mercante o militar, porque la información disponible es inadecuada. Las variables críticas —el diseño del casco, la superficie y el corte de las velas, el peso de la carga y la tasa de uso— son demasiado heterogéneas para establecer un promedio significativo. Aun así, Unger (1984) hizo una serie de suposiciones para calcular la contribución de los barcos de vela al consumo energético de los Países Bajos durante su Edad de Oro y dio con un total anual de 6,2 MW en el siglo XVII. Esta cantidad es muy parecida a la potencia total de los molinos de viento holandeses en esa misma época (De Zeeuw, 1978), pero solo representa una pequeña fracción (<5%) del consumo de turba del país.

Pero las comparaciones cuantitativas son engañosas: ni toda la turba del mundo hubiera hecho posible los viajes a las Indias; la energía útil de la turba era inferior a una cuarta parte de su valor calorífico bruto; y, por supuesto, es

imposible comparar los depósitos limitados y no renovables de un combustible fósil joven con un recurso abundante y renovable recargado constantemente por variaciones en la presión atmosférica. En realidad, las comparaciones de consumo o potencia agregados no tienen mayor sentido que las de eficiencias de conversión específicas (en este caso, el contraste entre la eficiencia de una vela y el rendimiento de una estufa de turba).

Edificios y estructuras

La enorme variedad de estilos de construcción y ornamentación puede resumirse recurriendo a cuatro elementos estructurales fundamentales: paredes, columnas, vigas y arcos. Su creación —a partir de los tres principales materiales de construcción de las sociedades preindustriales, madera, piedra y ladrillo, ya sea secado al sol o cocido — solo exigió mano de obra humana y unas pocas herramientas simples. Los árboles se talaban y moldeaban con hachas y azuelas. La extracción de la piedra solo requería martillos y cuñas y su moldeado, cinceles. Los ladrillos secados al sol podían fabricarse con arcilla aluvial de muy fácil acceso. En muchas regiones, la escasez de árboles grandes limitaba el uso de la madera, mientras que el elevado coste de transporte de la piedra solía desembocar en el uso de variedades locales. El trabajo de talla y ornamentación de la superficie de la madera y la piedra, que a menudo era muy elaborado, podía significar un aumento significativo del coste energético de los materiales de construcción.

Los ladrillos de barro secados al sol, comunes en Oriente Medio y el Mediterráneo, eran el material de construcción de menor consumo energético. Su producción alcanzó niveles prodigiosos, incluso en las primeras sociedades sedentarias. Esta es la descripción de la capital sumeria Uruk que ofrece la epopeya *Gilgamesh*, una de las primeras obras literarias conservadas, anterior a 2500 a. C. (Gardner, 2011): «Una parte es ciudad, otra parte huerto y la tercera, arcilla. Tres partes, incluyendo la arcilla, forman Uruk». Se fabricaban a partir de marga o arcilla, agua y paja (o paja desmenuzada). También podían

añadirse estiércol y arena. La mezcla se compactaba, se moldeaba rápidamente en moldes de madera (hasta 250 ladrillos/hora) y se dejaba secar al sol. Los tamaños iban desde piezas babilónicas cuadradas y gruesas (40 × 40 × 10 cm) hasta ladrillos romanos más delgados y alargados (45 × 30 × 3,75 cm). Como los ladrillos de barro son malos conductores de calor, ayudaban a mantener los edificios frescos en climas cálidos y áridos. Los ladrillos también tienen una importante ventaja mecánica: la construcción de una bóveda de ladrillos de barro no requiere vigas de madera para su soporte (Van Beek, 1987). Con la arcilla y la mano de obra adecuada, podían producirse en cantidades prodigiosas fácilmente.

El ladrillo cocido se usaba en la antigua Mesopotamia y más tarde se hizo común tanto en el Imperio romano como en la China Han. Durante siglos, la cocción se hizo en pilas o fosas al aire libre, lo que generaba un gran desperdicio de combustible y una cocción desigual. Más tarde, la cocción en pilas regulares permitió alcanzar temperaturas de hasta 800 °C, dando como resultado un producto más uniforme y una eficiencia mucho mayor. Los hornos horizontales completamente cerrados eran más consistentes y eficientes. Tenían conductos de humo espaciados de manera correcta y los gases calientes ascendentes se reflejaban hacia abajo desde los techos abovedados. Pero consumían leña o carbón. En Europa, el consumo aumentó mucho durante el siglo XVI, cuando el ladrillo comenzó a sustituir al bajareque y el tachonado de madera y empezó a utilizarse con más frecuencia para paredes y cimientos.

Más allá de los materiales, las estructuras preindustriales demuestran mucha habilidad a la hora de vincular el trabajo de muchas personas (incluyendo constructores expertos) o personas y animales y realizar así tareas extraordinariamente exigentes incluso en el mundo mecanizado actual. La extracción de piedra era manual. Los animales la transportaban al lugar adecuado y a veces también se usaban para accionar ascensores que podían elevar piezas pesadas, pero por lo demás la construcción tradicional dependía de mano de

obra humana. Los artesanos utilizaban sierras, hachas, martillos, cinceles, cepillos, taladros y espátulas y trabajaban con grúas o poleas compuestas y ruedas de tracción para levantar madera, piedra y vidrio (Wilson, 1990).

Las grúas (*cranes*) de tracción humana que hacían girar cabrestantes o molinetes o que pisaban tambores podían realizar esta última tarea fácilmente, aunque despacio, y algunas máquinas —incluido el ascensor de bueyes de Filippo Brunelleschi (1377-1446), que sirvió para elevar materiales de mampostería durante la construcción de la espectacular cúpula de la catedral de Santa María del Fiore, en Florencia, y una grúa giratoria para colocar la cúpula de la linterna (Prager y Scaglia, 1970)— estaban diseñadas para tareas específicas especialmente exigentes (recuadro 4.17). Algunos proyectos se completaron en poco tiempo: el Partenón en solo 15 años (447-432 a. C.), el Panteón en 8 (118-125 d. C.) y Santa Sofía de Constantinopla, una iglesia bizantina con una gran bóveda convertida más tarde en mezquita, en menos de cinco años (527-532).

Existen varios tipos de grandes proyectos de construcción especialmente relevantes. Los más conocidos son las estructuras ceremoniales, principalmente monumentos funerarios y lugares de culto. El primer grupo —pirámides y tumbas— se distingue por su masividad. El segundo —templos y catedrales— combina monumentalidad, complejidad y belleza. Entre las estructuras utilitarias —de uso práctico— cabe destacar los acueductos debido a su longitud y la combinación de canales, túneles, puentes y sifones invertidos.

No puede hacerse un balance energético exacto de la construcción de un edificio en la Antigüedad, e incluso durante la Edad Media es difícil de estimar. Con todo, sabemos que hubo diferencias sustanciales de consumo energético y potencia entre proyectos.

RECUADRO 4.17

Las ingeniosas máquinas de Brunelleschi

El trabajo de Filippo Brunelleschi en la catedral de Santa María del Fiore es una demostración perfecta del papel que jugaron el ingenio y la inventiva a la hora de desplegar la energía necesaria para cada circunstancia de un modo adecuado. Encontrar animales de tiro y trabajadores disponibles era fácil, pero el tamaño récord de la cúpula de la catedral (41,5 m de diámetro interior), así como el método de construcción, sin ningún andamiaje en tierra, que no tenía precedentes, no hubieran sido posibles nunca sin las máquinas de Brunelleschi (Prager y Scaglia, 1970; King, 2000; Ricci, 2014). Estas máquinas fueron desmanteladas una vez terminada la construcción, pero afortunadamente su diseño aparece en *Zibaldone*, de Buonaccorso Ghiberti.

Incluían grúas de apoyo en tierra, grúas elevadoras, un polipasto reversible, una grúa giratoria utilizada para la construcción de la linterna, elaborados cabrestantes (*winches*) y, quizá la máquina más ingeniosa de todas, un posicionador de carga (que Brunelleschi no inventó, si bien llevó a cabo la idea a la perfección). Los materiales de la cúpula fueron subidos con un montacargas central de bueyes. Los ladrillos llegaban fácilmente a los albañiles que construían la estructura curva ascendente, pero los pesados bloques de piedra utilizados para las anillas de amarre (*tie rings*) (necesarios para detener cualquier propagación de la estructura) no podían desplazarse hasta su emplazamiento definitivo —precisamente predeterminado— tirando o empujando: era necesario un posicionador de carga con dos guías horizontales atornilladas y montadas en una barra vertical y un contrapeso.

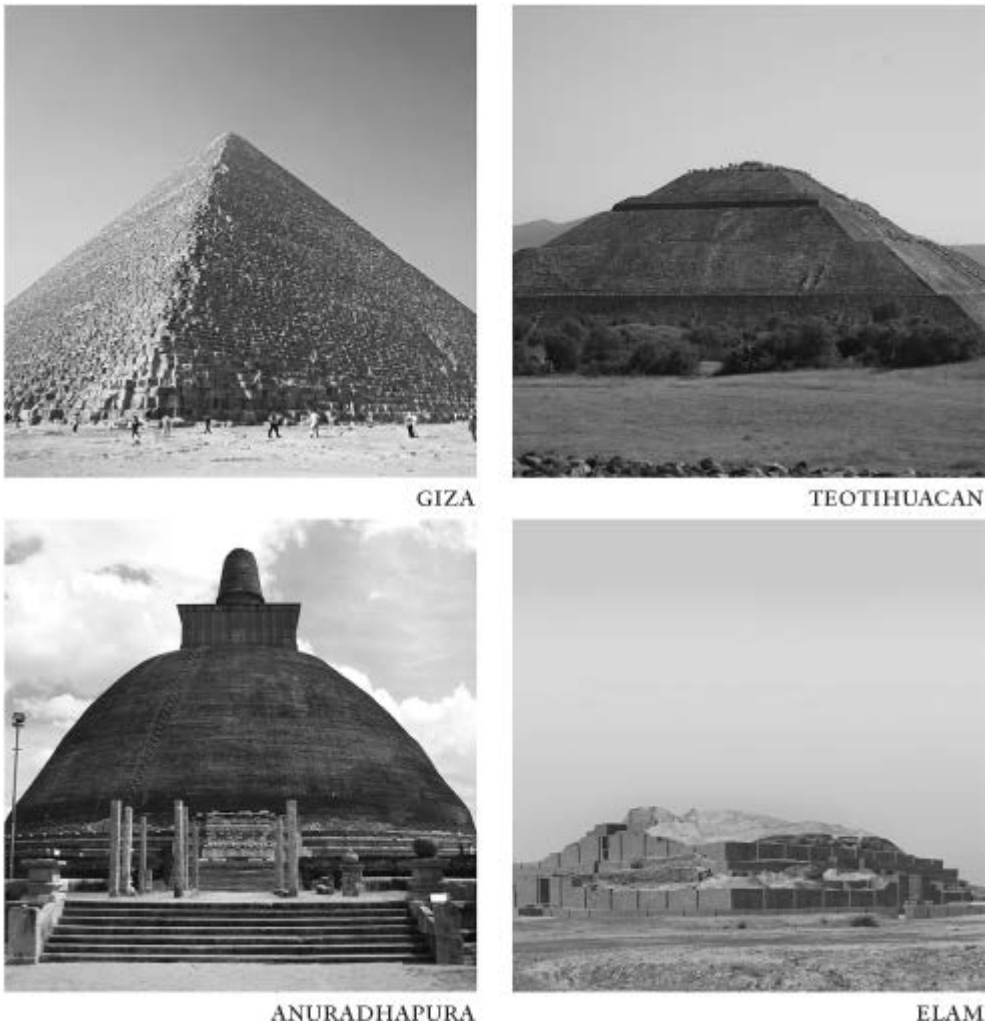


Figura 4.23 La pirámide de Keops en Giza, la Pirámide del Sol en Teotihuacán, la estupa Jetavanaramaya en Anuradhapura, y el zigurat de Choga Zanbil en Elam. Se puede encontrar información detallada sobre estas estructuras en Bandaranayke (1974), Tompkins (1976) y Ching, Jarzombek y Prakash (2011).

Todas las altas culturas preindustriales construyeron impresionantes estructuras funerarias o religiosas que requerían gigantescos y sostenidos flujos de energía —planificación a largo plazo, una excelente organización y movilización de mano de obra a gran escala— (Ching, Jarzombek y Prakash, 2011). Estos templos y tumbas expresan el anhelo humano universal de permanencia, perfección y trascendencia (figura 4.23). Me encantaría decir algo definitivo sobre el proceso de construcción de las pirámides egipcias, las estructuras más grandiosas del mundo antiguo, y su consumo

energético. Sabemos que su construcción requirió una combinación de planificación a largo plazo, una logística eficiente y de gran escala, una supervisión y un servicio eficaces, y habilidades técnicas admirables, aunque casi totalmente olvidadas.

La pirámide de mayor tamaño, la tumba de Keops, segundo faraón de la cuarta dinastía, es la que mejor encarna todas estas cualidades. Fue construida con 2,5 millones de piedras de 2,5 t de media, ensamblada con notable precisión y fabricada a una velocidad admirable. Pesa más de 6 Mt y su volumen es de 2,5 Mm^3. Dada la orientación de la Gran Pirámide (alineada con dos estrellas circumpolares, Mizar y Kochab), podemos situar el inicio de su construcción entre 2485 y 2475 a. C. (Spence, 2000), que requirió 15-20 años. Los egiptólogos han concluido que las piedras del núcleo se extrajeron de la población de Giza, que las piedras del revestimiento provenían de las canteras de Tura, al otro lado del Nilo, y que los bloques de granito más pesados, que formaban el techo curvado de la cámara sepulcral (y cuyo peso alcanzaba hasta 80 t), fueron enviados desde el sur de Egipto (Lepre, 1990; Lehner, 1997).

Todo esto parece bastante sensato. Los antiguos egipcios dominaron el arte de la extracción de piedra, tanto la producción en masa de bloques de forma homogénea como la extracción de monolitos masivos. También podían mover objetos pesados por mar y tierra. Un fresco muy conocido muestra cómo un coloso de 50 t de una cueva en Deir el-Bersha (1880 a. C.) fue transportado por 127 hombres (con una potencia útil máxima de más de 30 kW) en un trineo cuya fricción se reducía vertiendo agua a su paso. Y que las piedras más grandes fueron transportadas en barcos está atestiguado por una imagen única de Deir el-Bahari: dos obeliscos de Karnak de 30,7 m de largo fueron transportados en una barcaza de 63 m de largo tirada por 900 remeros dispuestos en 30 barcos (Naville, 1908).

Sin embargo, más allá de la extracción y el traslado de las piedras, todo son conjeturas: todavía no sabemos cómo se construyeron realmente las grandes pirámides (Tompkins, 1971; Mendelssohn,

1974; Hodges, 1989; Grimal, 1992; Wier, 1996; Lehner, 1997; Edwards, 2003). El registro jeroglífico y pictórico egipcio, tan rico en muchos otros aspectos, no ofrece ninguna representación o descripción contemporánea. Los supuestos modernos más comunes especifican el uso de rampas de arcilla, ladrillo y piedra, sin consenso sobre su forma (un solo plano inclinado, múltiples planos, una rampa envolvente, etc.) o inclinación (se sugieren proporciones entre 1:3 y 1:10). Pero tales desacuerdos no importan, porque lo más probable es que no se usaran rampas (Hodges, 1989).

El uso de un único plano inclinado requeriría su reconstrucción completa después de que cada nivel fuera terminado, y con una pendiente de 10:1 su volumen habría superado con creces el de la propia pirámide. Una rampa envolvente habría sido estrecha, complicada de construir, apuntalar y mantener, y difícil (sino imposible) de franquear. Se ha sugerido la posibilidad de que las cuerdas giraran en ángulo recto alrededor de postes situados en las esquinas, pero no tenemos ninguna prueba de que el sistema funcionara o de que los egipcios lo conocieran. En cualquier caso, no se han hallado restos de grandes volúmenes de escombros de construcción de rampas en ningún lugar de la meseta de Giza.

La primera descripción de la construcción de las pirámides egipcias corresponde a Heródoto (484-425 a. C.), dos mil años después de su finalización. Durante sus viajes por Egipto le explicaron que:

> Esta pirámide se edificó de modo y manera que en ella quedasen unas gradas, que algunos llaman escalas y otros llaman altares. Cuando esta, en su primera forma, se completó, los trabajadores utilizaron cortos trozos de madera como palancas para levantar el resto de las piedras; se levantaron los bloques del suelo al primer nivel de escalones; cuando la piedra ya se había alzado, se situaba en otra palanca que se encontraba en el primer nivel, y la palanca se utilizaba de nuevo para levantarla de este nivel al siguiente. Es posible que hubiera una nueva palanca en cada nivel de las gradas,

o tal vez solo había una palanca, muy portátil, que llevaban a cada nivel, cada vez; dejo esto como incierto, ya que se mencionaron dos posibilidades. Pero una cosa sí es cierta: la parte superior de la pirámide se empezó a pulir primero, luego la siguiente debajo de ella, y finalmente la base y la parte más baja.

¿Es posible que esta descripción se corresponda con lo que ocurrió realmente? Aquellos que apuestan por la elevación piensan que sí, y han ofrecido muchas posibles explicaciones de cómo este sistema de construcción pudo funcionar con ayuda de palancas o máquinas simples pero inteligentes. Hodges (1989) defendió el método más sencillo de todos: utilizar palancas de madera para levantar bloques de piedra y luego rodillos para colocarlos. Las principales críticas de este proceso tienen que ver con el gran número de transferencias verticales necesarias para colocar los bloques de las gradas más altas y la necesidad de una atención y precisión constantes para evitar caídas accidentales durante la manipulación de piedras de 2-2,5 t.

Más allá de los detalles constructivos, los primeros principios nos permiten suponer el requisito total de energía para la construcción de la Gran Pirámide y, por tanto, estimar la mano de obra necesaria para la misma: según mis cálculos, no menos de 10.000 personas (recuadro 4.18). Una de las pocas certezas con respecto a la construcción de la pirámide es que resulta claramente exagerado suponer que pudiera requerir una cantidad de mano de obra de una o varias magnitudes más. Alimentar a tantos trabajadores concentrados en la meseta de Giza hubiera sido un factor tanto más limitante que el transporte y la elevación de las piedras.

Otras estructuras antiguas que requirieron un compromiso de mano de obra de muy largo plazo fueron las torres escalonadas de los templos mesopotámicos (zigurats) construidas después de 2200 a. C., y las estupas (o dagobas), monumentos construidos en honor a Buda y que solían albergar reliquias (Ranaweera, 2004). Falkenstein (1939) calculó que la construcción del zigurat de Uruk, en el actual Irak,

movilizó el trabajo de 1.500 hombres diez horas al día durante cinco años, equivalente a una energía total de casi 1 TJ. Y Leach (1959) estimó que Jetavanaramaya, la mayor estupa de Anuradhapura (de 122 m de altura y construida con 93 millones de ladrillos cocidos toscamente colocados), ocupó a 600 trabajadores cien días al año durante cincuenta años, correspondiente a más de 1 TJ de energía útil (figura 4.23).

Las pirámides mesoamericanas también son bastante imponentes, especialmente las de Teotihuacán (construidas durante el siglo II) y Cholula. La más alta es la Pirámide del Sol de Teotihuacán, de punta plana, que incluyendo el templo medía algo más de 70 m (figura 4.23). Su construcción fue mucho más sencilla que la de las pirámides de Giza. El núcleo está formado por tierra, escombros y ladrillos de adobe y el exterior está revestido de bloques de piedra unidos con mortero de cal (Baldwin, 1977). Aun así, su construcción pudo requerir el trabajo de hasta 10.000 personas durante más de veinte años.

RECUADRO 4.18

Coste energético de la Gran Pirámide de Guiza

La energía potencial de la Gran Pirámide (necesaria para levantar 2,5 Mm^3 de piedras) es de 2,5 TJ. Wier (1996) acertó en el total, pero su hipótesis de trabajo útil medio de 240 kJ/día era demasiado baja. Mi hipótesis es la siguiente. Cortar 2,5 Mm^3 de piedra en 20 años (la duración del reinado de Keops) habría requerido el trabajo de 1.500 canteros trabajando durante 300 días/año y produciendo 0,25 m^3/persona/día de piedra con cinceles de cobre y martillos de dolerita. Incluso suponiendo que se hubiera necesitado el triple de canteros para pulir y cuadrar las piedras (aunque muchos bloques interiores solo estaban pulidos en bruto) y trasladarlas hasta el emplazamiento de la pirámide, la mano de obra total implicada en el suministro del material de construcción rondaría las 5.000 personas.

Con un *input* diario neto de energía útil de 400 kJ/persona, la elevación de las piedras habría significado 6,25 millones de días de trabajo, es decir, el

esfuerzo acumulado de 1.000 trabajadores durante 20 años, 300 días al año. Si se hubiera necesitado el mismo número de personas para colocar las piedras en su lugar (o incluso si ese número se duplicara, pensando en labores adicionales de organización y supervisión, transporte, reparación de herramientas, entrega de alimentos, cocina y lavado de ropa), la mano de obra implicada total seguiría siendo inferior a 10.000 personas. Durante los periodos de trabajo más intensos, los trabajadores de la pirámide invertían colectivamente al menos 4 GJ/hora de energía mecánica útil, es decir, una potencia total de 1,1 MW. Para mantener este esfuerzo, consumían 20 GJ/día de energía alimentaria, el equivalente a 1.500 t de trigo.

Wier (1996) concluyó que hubo 13.000 trabajadores implicados en la construcción de las pirámides durante 20 años. Hodges (1989) calculó que 125 equipos —unas 1.000 personas— pudieron haber elevado y colocado todas las piedras en solo 17 años de trabajo, y que el acabado de las piedras de revestimiento, procediendo desde la cima, pudo requerir otros 3 años. En contraste, a Heródoto se le dijo que 100.000 hombres trabajaron en la construcción de la pirámide durante 20 años (aunque solo 3 meses/año), mientras que Mendelssohn (1974) estimó un total de 70.000 trabajadores estacionales y hasta 10.000 albañiles permanentes. Ambas son exageraciones indefendibles.

En contraste con el misterioso proceso de construcción de las pirámides más grandes, la construcción de estructuras clásicas como el Partenón o el Panteón no guarda ningún secreto (Coulton, 1977; Adam, 1994; Marder y Jones, 2015). El notable diseño del Panteón se cita a menudo como ejemplo de uso ingenioso del hormigón, aunque la afirmación a menudo repetida de que los romanos fueron los primeros constructores en utilizar este material es inexacta. El hormigón es una mezcla de cemento, agregados (arena, guijarros) y agua, y el cemento se produce mediante el procesamiento a alta temperatura de una mezcla cuidadosamente formulada y finamente molida de cal, arcilla y óxidos metálicos en un horno rotatorio inclinado, pero el *opus caementicium* (conocido como hormigón romano) utilizado para construir el Panteón —o cualquier otro

edificio hasta la década de 1820— no contenía cemento (recuadro 4.19).

Sabemos que los arquitrabes más pesados (como los del Partenón, de casi 10 t) eran elevados por una grúa (y podían rodar hasta la obra encajados en marcos circulares) cuyo diseño era muy parecido al de las grúas que se utilizaron casi dos mil años más tarde para la construcción de catedrales, las estructuras más elaboradas de la Edad Media europea. Entre los constructores había muchos artesanos experimentados y se requería el uso de muchas herramientas especiales (Wilson, 1990; Erlande-Brandenburg, 1994; Recht, 2008; Scott, 2011). Buena parte de la mano de obra era estacional, aunque la construcción de un gran edificio habitualmente habría requerido el trabajo de centenares de personas a tiempo completo —leñadores, canteros, conductores de carros, carpinteros, albañiles, vidrieros— durante una o dos décadas. La inversión energética total, por tanto, era dos órdenes de magnitud más pequeña que en la construcción de pirámides, con flujos de trabajo máximos de solo unos pocos cientos de kW.

RECUADRO 4.19

El Panteón de Roma

El *opus caementicium* u hormigón romano era una mezcla de agregados (arena, grava, piedras, a menudo también ladrillos o tejas rotas) y agua, pero su agente aglutinante no era el cemento (como ocurre en el hormigón), sino el mortero de cal (Adam, 1994). La mezcla se preparaba directamente en la obra, y la combinación única de cal muerta y arena volcánica —extraída cerca de Puteoli (hoy en día Pozzuoli, a pocos kilómetros al oeste del Vesubio) y conocida como *pulvere puteolano* (y más tarde como *pozzolana* y en español puzolana)— generaba un material resistente que podía endurecerse incluso debajo del agua. Aunque era peor que el hormigón moderno, la puzolana y una cal de alta calidad producían un material suficientemente fuerte para construir no solo muros masivos y duraderos, sino también grandes bóvedas y cúpulas (Lancaster, 2005).

El uso del *opus caementicium* en el Imperio romano alcanzó su apogeo —en términos de diseño— con la construcción del Panteón, que se completó en 126 d. C., durante el gobierno de Adriano. La cúpula, de 43,3 m de diámetro (el interior de la estructura cabía en una esfera del mismo diámetro), no llegó a ser superada nunca por ningún constructor preindustrial, aunque la cúpula de San Pedro, diseñada por Miguel Ángel y terminada en 1590, alcanzó los 41,75 m (Lucchini, 1966; Marder y Jones, 2015). Además de su evidente atractivo visual, la propiedad más notable de la cúpula es su masa específica decreciente verticalmente: las cinco filas de casetones cuadrados del techo no solo disminuyen de tamaño a medida que convergen en el óculo central, sino que están construidos con capas cada vez más finas de mampostería utilizando agregados más ligeros, desde travertino en la parte inferior hasta piedra pómez en la parte superior (MacDonald, 1976). La cúpula entera pesa 4.500 t.

Aunque algunas catedrales se construyeron rápidamente (como Chartres, en 27 años, o Notre Dame de París, en 37), muchas veces el proceso se veía interrumpido por epidemias, problemas laborales, cambios de régimen, escasez de fondos o conflictos internos o internacionales. Como resultado, la construcción de una catedral solía durar varias generaciones. En algunos casos se necesitaron siglos: la catedral de San Vito, en Praga, iniciada por el rey Carlos IV en 1344, fue abandonada a principios del siglo XV: fue retomada mucho más tarde y completada (mediante el añadido de dos agujas góticas) en 1929 (Kuthan y Royt, 2011).

Existen grandes obras hidráulicas —como presas, puentes y canales— muy bien documentadas desde Jerusalén, Mesopotamia y Grecia. Con todo, no hay duda de que las mejores soluciones de ingeniería para el suministro urbano de agua son las romanas. Prácticamente toda ciudad romana de cierto tamaño disponía de un buen sistema de suministro de agua. Hubo que esperar a la industrialización para que surgieran mejores soluciones. Los acueductos romanos eran especialmente impresionantes (figura 4.24). Plinio el Viejo, en su *Historia Natural*, dice que son «el mayor logro del mundo».

Empezando por el Aqua Appia, en 312 a. C., un sistema de suministro de agua que llegó a comprender 11 líneas y cubrir casi 500 km (Ashby, 1935; Hodge, 2001). A finales del siglo I d. C., el suministro total de agua era de más de 1 Mm^3/día (1 GL/día), esto es, más de 1.500 l/persona, mientras que a finales del siglo XX en Roma, con una población de 3,5 millones de habitantes, la media (incluyendo usos industriales) era de 500 l/persona (Bono y Boni, 1996). La escala del sistema de canales de desagüe subterráneos de Roma era igual de impresionante: los arcos de la Cloaca Máxima podían alcanzar 5 m de diámetro.

Durante el Imperio romano, los acueductos consistían en una serie de elementos estructurales comunes (figura 4.24). Los canales de agua, que partían de manantiales, lagos o embalses artificiales, tenían una sección transversal rectangular y estaban construidos con placas de piedra u hormigón revestido de cemento fino. Tenían una pendiente mínima de 1:200 y seguían inclinaciones naturales para evitar la construcción de túneles siempre que fuera posible. Cuando era inevitable construir un curso subterráneo, se podía acceder al canal desde arriba por medio de pozos. Los romanos solo recurrían a la construcción de puentes en valles demasiado largos para ser evitados o demasiado profundos para la construcción de simples terraplenes. Estos puentes representaban 65 km de red de transporte de agua. Los puentes agustinos del Gard (más de 50 m de altura), Mérida y Tarragona son los más elegantes. La limpieza y reparación de canales, túneles y puentes, continuamente amenazados por la erosión, era una tarea continua.

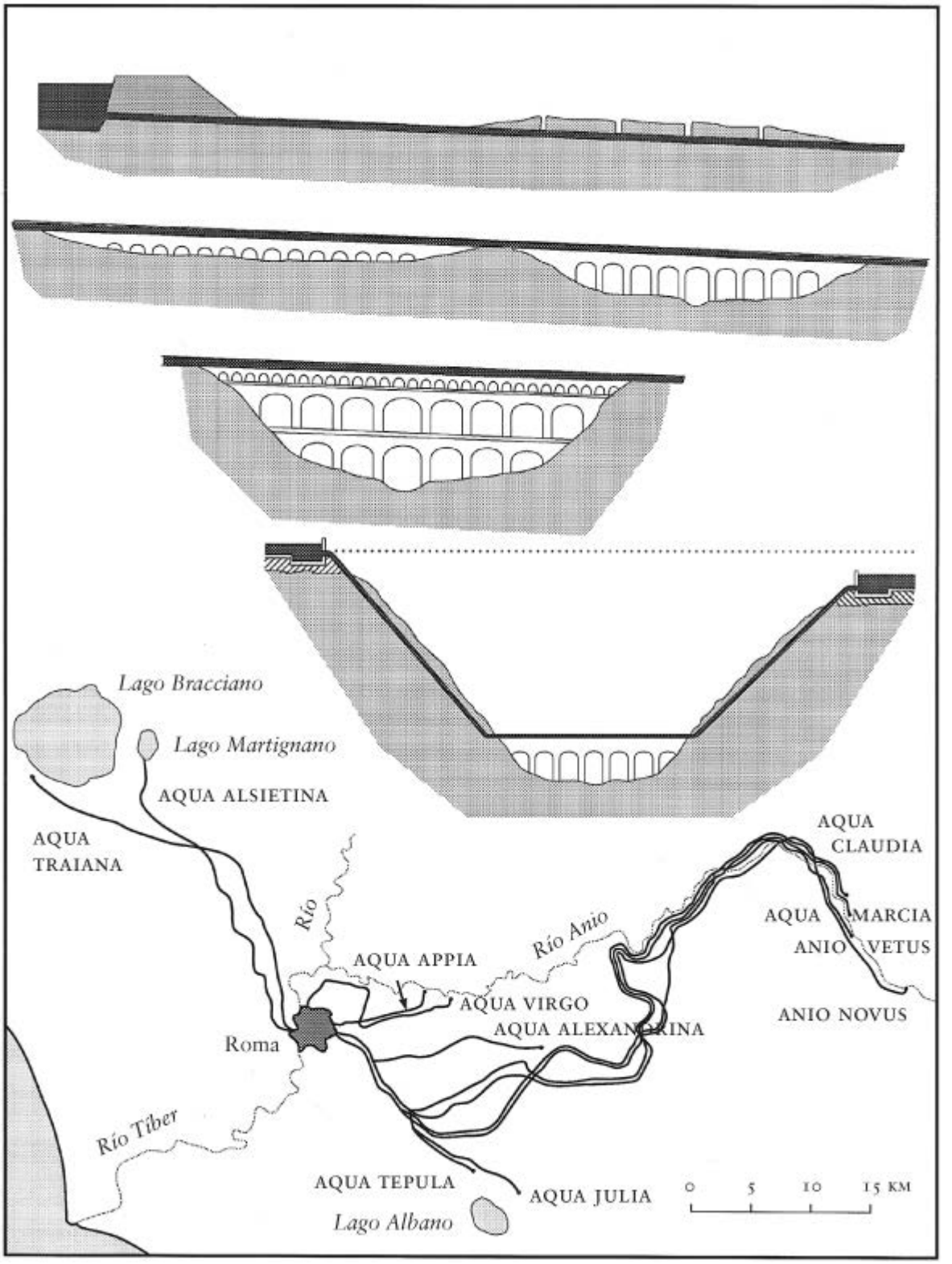


Figura 4.24 Los acueductos romanos transportaban el agua de los ríos, manantiales, lagos o embalses combinando al menos dos o tres de estas estructuras (empezando por arriba): canales rectangulares poco profundos y de base sólida, túneles accesibles

mediante pozos, terraplenes atravesados por arcos, puentes arqueados de uno o dos niveles y sifones de plomo invertidos para llevar el agua a través de valles profundos. Los acueductos de la ciudad de Roma, que suministraban 1 Mm^3/día de agua, formaban un sistema impresionante construido a lo largo de más de 500 años. Fuentes: Ashby (1935) y Smith (1978). La pendiente del acueducto es exagerada.

Cuando cruzar un valle requería un puente de más de 50-60 m de altura, los ingenieros romanos optaban por construir un sifón invertido. Sus tuberías conectaban un depósito de cabecera en un lado del valle con un depósito receptor ligeramente más bajo en el lado opuesto (Hodge, 1985; Schram, 2014). De todos modos, cruzar el arroyo situado en el fondo del valle requería construir un puente igualmente. El elevado coste energético de estas estructuras reflejaba principalmente las grandes cantidades de plomo necesarias para las tuberías de alta presión —podían soportar hasta 1,82 MPa (18 atmósferas)—, así como el coste de transporte del metal a través de distancias a menudo considerables desde los centros de fundición. Por ejemplo, la cantidad total de plomo utilizada para los nueve sifones de la red de suministro de agua de Lyon fue de 15.000 t.

METALURGIA

El despertar de todas las antiguas altas culturas está marcado por el uso de metales de color (no ferrosos). Además del cobre, los primeros metalúrgicos también conocían el estaño (que se combinaba con el cobre para hacer bronce), el hierro, el plomo, el mercurio y dos metales preciosos, la plata y el oro. El mercurio es líquido a temperatura ambiente, mientras que la relativa escasez y blandura del oro impedía su uso más allá de la acuñación de monedas y usos ornamentales. Aunque mucho más abundante, la plata también era demasiado escasa para la producción de artículos en masa. La blandura del plomo y el estaño limitaba en buena medida sus usos no aleados a la construcción de tuberías y contenedores de alimentos. Solo el cobre y el hierro eran relativamente abundantes y poseían

(especialmente cuando estaban aleados) una gran resistencia a la tracción y dureza. Por eso se convirtieron en las dos únicas opciones prácticas para la producción en masa de artículos duraderos. Los dos primeros milenios de historia escrita estuvieron dominados por el cobre y el bronce, mientras que el hierro y sus aleaciones (una enorme variedad de aceros) son ahora más dominantes que nunca.

El carbón vegetal alimentaba la fundición de minerales no ferrosos y hierro, así como el posterior refinado y acabado de metales brutos y objetos metálicos. La mano de obra humana se encargaba de todo: la extracción y trituración de minerales, la tala de árboles y la fabricación de carbón vegetal, la construcción y carga de hornos de fundición, la fundición en sí, el refinado y la forja. En muchas sociedades —desde el África subsahariana hasta Japón— la metalurgia siguió siendo exclusivamente manual hasta la introducción de métodos industriales modernos. En Europa, y más tarde en América del Norte, los animales y sobre todo la energía hidráulica se encargaron de tareas repetitivas y agotadoras, como la trituración de minerales y la forja de metales o el bombeo de agua desde las minas. La disponibilidad de madera y, más tarde, la accesibilidad y fiabilidad de la energía hidráulica necesaria para accionar fuelles y martillos de mayor tamaño fueron los dos principales factores que disuadieron el progreso metalúrgico.

Metales no ferrosos

Las herramientas y armas de cobre tienden un puente entre las edades de Piedra y Hierro. Los primeros usos del cobre, fechados en el sexto milenio a. C., no implicaban fundición alguna. Consistían en el uso de piezas de metal naturalmente puro, trabajadas con herramientas simples o recocidas alternando el calentamiento y el martillado (Craddock, 1995). Las primeras pruebas de explotación de metal nativo —en forma de perlas de malaquita y cobre en el sudeste de Turquía— se remontan a 7250 a. C. (Scott, 2002). La fundición y el moldeado del metal se hicieron comunes a partir de mediados del IV

milenio a. C. en varias regiones con minerales de óxido y carbonato ricos y relativamente accesibles (Forbes, 1972). Hemos recuperado objetos de cobre —como anillos, cinceles, hachas, cuchillos o lanzas— pertenecientes a las primeras sociedades mesopotámicas (antes de 4000 a. C.), el Egipto predinástico (antes de 3200 a. C.), la cultura Mohenjo-Daro, en el valle del Indo (2500 a. C.) y los antiguos chinos (después de 1500 a. C.).

Los epicentros de la minería de cobre durante la Antigüedad incluyeron la península del Sinaí, en Egipto, el norte de África, Chipre, los actuales Afganistán, Irán y Siria, la región del Cáucaso y Asia Central. Más tarde, Italia, Portugal y España también se convirtieron en centros de producción. Debido a su punto de fusión relativamente alto (1.083 °C), la producción de cobre puro siempre fue intensiva en energía. La reducción del mineral se hacía con madera o carbón, primero en fosas revestidas de arcilla y más tarde en hornos de cuba de arcilla y tiro natural (*low shaft clay furnaces with a natural draft*). La primera prueba clara de uso de fuelles proviene de Egipto en el siglo XVI a. C. El metal impuro se refinaba calentándolo en pequeños crisoles, tras lo cual se fundía en moldes de piedra, arcilla o arena. Las piezas fundidas se transformaban en productos prácticos u ornamentales mediante martillado, afilado (*grinding*), perforado y pulido.

La producción de metal a partir de minerales sulfuros requería habilidades técnicas mucho más elevadas (Forbes, 1972). Primero había que triturarlos y tostarlos (*roasted*) en pilas u hornos para eliminar el azufre y otras impurezas (antimonio, arsénico, hierro, plomo, estaño y zinc) que modifican las propiedades del metal. Durante miles de años, y hasta el siglo XX en regiones de Asia y África, la trituración de los minerales se hizo mediante martillado a mano. En Europa, las norias de agua y los cabrestantes de eje vertical accionados por caballos (*horses harnessed to whims*) se hicieron cargo gradualmente de este trabajo. La torrefacción de los minerales triturados no consumía mucho combustible, y la fundición en hornos

verticales precedía a la fundición del metal grueso (solo 65-75% de cobre) y su refundición para obtener cobre blister casi puro (95-97%). Este producto podía refinarse aún más mediante oxidación, escoriación y volatilización, secuencia que exigía más consumo de combustible.

Calcular el consumo anual y acumulado de combustible de las antiguas operaciones de fundición es un ejercicio inherentemente incierto, muy influenciado por las hipótesis de masa total de escoria y tiempo de extracción e intensidad energética de la fundición. Esta incertidumbre queda perfectamente reflejada en Riotinto, en el suroeste de España, a menos de 100 km al oeste de Sevilla, la mayor concentración de fundición del mundo antiguo (recuadro 4.20). En cualquier caso, la actividad de fundición del Imperio romano no se superó hasta 1.500 años más tarde. De hecho, los análisis de la actividad metalúrgica de finales de la Edad Media (Agricola, 1912 [1556]; Biringuccio, 1959 [1540]) describen prácticas de fundición de cobre muy parecidas a las de Riotinto.

RECUADRO 4.20

Consumo de leña de la fundición romana de cobre y plata de Riotinto

La primera cartografía realizada de la ingente cantidad de escoria de Riotinto arrojó una estimación de 15,3 Mt de escoria producida por la minería de plomo y plata y 1 Mt por la de cobre; esta conclusión condujo a Salkield (1970) a suponer que los romanos cortaron 600.000 árboles adultos al año para alimentar la fundición, lo cual habría sido imposible en el sur de España. Un análisis más reciente (basado en una extensa labor de perforación) estimó que la masa total de escoria pudo ser de 6 Mt. Aunque el cobre fue el principal producto de la mina durante la época romana, también existió una intensa actividad de fundición de plata en la época prerromana (Rothenberg y Palomero, 1986). Con una relación escoria/carbón de 1:1 y madera/carbón de 5:1, la producción de 6 Mt de escoria habría requerido consumir 30 Mt de madera (o 75.000 t/año durante 400 años de operaciones a gran escala).

El suministro de madera mediante la tala de bosques naturales (con no más de 100 t/ha) habría requerido la tala anual de 750 ha de bosque, el equivalente a un círculo con un radio de 1,5 km: habría sido una empresa importante, pero manejable, y que desde luego habría dado lugar a una amplia deforestación. Análogamente, siglos de fundición de cobre en Chipre (a partir de 2600 a. C.) dejaron más de 4 Mt de escoria tras de sí. Es evidente que la fundición fue una causa importante de deforestación en la región del Mediterráneo durante la Antigüedad, así como en Transcaucasia y Afganistán. La escasez de madera local limitó el alcance de la fundición.

Desde los inicios de la fundición de cobre, parte del metal se incorporó al bronce. Fue la primera aleación práctica. Christian Thomsen la eligió para dividir la evolución humana en edades de Piedra, Bronce y Hierro (Thomsen, 1836). En realidad, se trata de una división superficial. Algunas sociedades (sobre todo la egipcia antes de 2000 a. C.) atravesaron una auténtica Edad de Cobre, mientras que otras (sobre todo en África subsahariana) pasaron directamente de la Edad de Piedra a la del Hierro. Los primeros bronces surgieron de la fundición inadvertida de minerales de cobre que contenían estaño. Más tarde se produjeron mediante la fusión de ambos minerales y, finalmente, después de 1500 a. C., se crearon fundiendo los dos metales juntos. El estaño, cuyo punto de fusión es de solo 231,97 °C, se producía a partir de sus minerales de óxido triturados (*its crushed oxide ores*) y consumía relativamente poco carbón. Por tanto, el coste energético total del bronce era inferior al del cobre puro, y además era una aleación con mejores propiedades.

Como las partes de estaño variaban entre un 5 y un 30% (y, por tanto, los puntos de fusión entre 750 y 900 °C), es imposible definir un bronce típico. La aleación habitual de las armas de fundición (90% cobre-10% estaño) tenía una resistencia de tracción y una dureza 2,7 veces superior a las del mejor cobre estirado en frío (Oberg *et al*., 2012; recuadro 4.21). La disponibilidad de bronce trajo consigo los primeros buenos cuchillos, hachas, cinceles y rodamientos metálicos,

así como las primeras buenas espadas, tanto de corte como de empuje. Las campanas de bronce solían contener un 25% de estaño.

La otra aleación de cobre históricamente importante ha sido el latón, que combina un 50-85% de cobre con zinc. Como ocurre con el bronce, su producción requiere menos energía que la fundición de cobre puro porque el punto de fusión del zinc es de solo 419 °C. Un mayor contenido en zinc mejora la resistencia a la tracción y la dureza de la aleación (las del latón típico son 1,7 veces más elevadas que las del cobre estirado en frío) sin reducir la maleabilidad y resistencia a la corrosión de la aleación. Los primeros usos del latón datan del siglo I a. C. Su uso creció mucho a partir del siglo XI en Europa y después de 1500 se volvió común.

RECUADRO 4.21

Resistencia a la tracción y dureza de los metales y aleaciones comunes

Metal o aleación	Resistencia a la tracción (MPa)	Dureza Brinell
Cobre		
Recocido	220	40
Estirado en frío	300	90
Bronce (90% Cu, 10% Sn)	840	240
Latón (70% Cu, 30% Zn)	520	150
Hierro fundido	130-310	190-270
Acero	650->2.000	280->500

Fuente: Oberg *et al.* (2012).

Hierro y acero

La sustitución del cobre y el bronce por el hierro fue lenta. Durante la primera mitad del tercer milenio a. C. se produjeron pequeños objetos de hierro en Mesopotamia. Después de 1900 a. C. se utilizó hierro en adornos y armas ceremoniales. Después de 1400 a. C. el uso de hierro se hizo corriente, aunque solo se volvió realmente abundante a partir de 1000 a. C. La Edad de Hierro en Egipto data del siglo VII a. C. y en China del siglo VI a. C. La fabricación de hierro en África también es antigua. En cambio, ninguna sociedad del Nuevo Mundo fundió hierro.

La fundición de hierro estaba necesariamente ligada a la producción de carbón a gran escala. El hierro se funde a 1.535 °C; un fuego simple de carbón puede alcanzar 900 °C, pero un suministro de aire forzado suplementario puede elevar la temperatura hasta 2.000 °C. Por tanto, el carbón vegetal alimentó la fundición de mineral de hierro de todas las sociedades tradicionales excepto la china (donde también se utilizó carbón mineral desde la dinastía Han), aunque la eficiencia de su producción y uso metalúrgico mejoraron gradualmente.

La fabricación de hierro comenzó en hornos semiexcavados en el suelo, poco profundos, a menudo revestidos de arcilla o piedra, en los que se fundía el mineral de hierro triturado con carbón vegetal. Muchas veces estos hornos primitivos estaban situados en la cima de una colina para maximizar el tiro natural. Más tarde se utilizaron estrechos tubos de arcilla (*tuyères*) para soplar aire en el horno, primero con pequeños fuelles de cuero manuales, después con fuelles más grandes dotados de un pedal o una barra oscilante (*rocking bar*) y, finalmente, en toda Europa con fuelles mucho más potentes impulsados por ruedas hidráulicas. Para contener la fundición se erigían simples muros de arcilla: su altura era de entre unos pocos decímetros y más de un metro, aunque en algunas regiones del Viejo Mundo (incluida África Central) alcanzaron más de dos metros (Van Noten y Raymaekers, 1988).

Los arqueólogos han hallado miles de estructuras así en el Viejo Mundo, desde la península ibérica hasta Corea y desde el norte de Europa hasta África central (Haaland y Shinnie, 1985; Olsson, 2007; Juleff, 2009; Park y Rehren, 2011; Sasada y Chunag, 2014). En la península ibérica se las conoce como ferrerías de monte. La temperatura de estos pequeños hornos de carbón vegetal no alcanzaba más de 1.100-1.200 °C, suficiente para reducir el óxido de hierro, pero muy por debajo del punto de fusión del hierro (el hierro puro se licua a 1.535 °C). Su producto final eran esponjas de hierro con un peso típico de 5-15 kg durante la Edad Media y 30-50 kg más adelante (y pudiendo incluso superar los 100 kg), así como escorias ricas en hierro y llenas de impurezas no metálicas (Bayley, Dungworth y Paynter, 2001).

Estas esponjas de hierro contenían un 0,3-0,6% de carbono y tenían que ser recalentadas y martilladas repetidamente para producir una masa de hierro forjado resistente y maleable con menos de un 0,1% de carbono. El hierro forjado se usaba para fabricar objetos y herramientas que iban desde clavos hasta hachas. La demanda europea de esponjas de hierro comenzó a aumentar en el siglo XI debido a la adopción de cotas de malla de hierro y el incremento de la producción de armas de mano, cascos y herramientas e instrumentos comunes que iban desde hoces y azadas hasta aros y herraduras. Las bandas de metal (*metal bands*) también se utilizaron en la construcción de catedrales, y el nuevo palacio papal, el Palais des Papes, en Aviñón, cuya construcción comenzó en 1252, requirió 12 t de metal de construcción (Caron, 2013).

Los chinos de la dinastía Han (207 a. C.-220 d. C.) fueron los primeros artesanos en producir hierro líquido. Sus hornos, construidos con arcilla refractaria y reforzados con troncos de parra o madera pesada, llegaron a superar los 5 m. Tenían una capacidad de carga de 1 t de mineral de hierro y podían producir hierro fundido dos veces al día. El alto contenido en fósforo, que reducía el punto de fusión del hierro, y la invención de los fuelles de doble acción (*double-acting*

bellows), que generaban fuertes ráfagas de aire, fueron ingredientes críticos de este temprano éxito (Needham, 1964). Más adelante se utilizaron fuelles más potentes empujados por ruedas hidráulicas, así como carbón colocado alrededor de conjuntos de crisoles tubulares. La fundición en moldes intercambiables para la producción en masa de herramientas de hierro, ollas y sartenes de paredes delgadas y estatuas empezó antes del final de la dinastía Han (Hua, 1983). Posteriormente surgieron pocas mejoras sustanciales, de tal manera que los antiguos pequeños hornos de China no fueron los predecesores de las enormes estructuras actuales, sino que estas surgieron como resultado de la lenta evolución de los hornos bajos europeos: desde la simple forja catalana a los hornos de osmosis revestidos de roca de Escandinavia, pasando por los *Stuckofen* de Estiria.

El consumo de combustible se redujo con la mejora de la forma de los hornos y el aumento de la altura de las chimeneas. Asimismo, la elevación de la temperatura y un contacto más prolongado entre el mineral y el combustible produjeron hierro líquido. Es muy probable que los altos hornos europeos se originaran en el valle del bajo Rin poco antes de 1400. Los altos hornos producen hierro fundido o arrabio, una aleación con un 1,5-5% de carbono que no puede ser forjada o laminada directamente. Su resistencia a la tracción es inferior a la del cobre (hasta un 55% más baja), pero su dureza es 2-3 veces mayor (Oberg *et al*., 2012; recuadro 4.21). El número de altos hornos creció de manera constante durante los siglos XVI y XVII. La mejora más notable de la época fue la introducción de fuelles de cuero más grandes, con partes superior e inferior de madera y lados de cuero de toro. Después de 1620 llegó el fuelle doble —operado por levas situadas en el eje de una rueda hidráulica—, así como la elongación gradual de la chimenea (*stack*). Ambas tendencias de mejora toparon pronto con los límites impuestos por la potencia máxima de las ruedas hidráulicas y las propiedades físicas del carbón vegetal. En 1750 las ruedas hidráulicas más grandes del mundo suministraban hasta 7 kW de potencia útil. Sin embargo, durante las campañas de fundición de

verano a menudo no había suficiente agua para alcanzar un rendimiento óptimo. La principal desventaja del carbón vegetal es su elevada friabilidad: como se rompe con cargas muy pesadas, limita la masa de mineral y piedra caliza que pueden cargarse, lo cual a su vez limita la altura de las chimeneas de los altos hornos a menos de 8 m (Smil, 2016; figura 4.25). Estas dos limitaciones desaparecieron poco antes de 1800 gracias a la máquina de vapor de Watt y el uso de coque.

Los hornos medievales necesitaban 3,6-8,8 veces más combustible que masa de mineral cargado (Johannsen, 1953). Incluso con mineral con un 60% de hierro, las esponjas de hierro habrían necesitado 8-20 kg de carbón vegetal por kg de metal caliente. A finales del siglo XVIII, la proporción típica de carbón vegetal/metal era de 8:1; en 1900 se redujo a solo 1,2, y a 0,77 en los hornos de carbón vegetal suecos (Campbell, 1907; Greenwood, 1907). Así, a finales del siglo XIX un buen horno de carbón solo consumía una décima parte de la energía que consumía su homólogo medieval. El elevado consumo energético de la fundición de carbón anterior a 1800 causó muchísima deforestación en los alrededores de los hornos. Un horno inglés típico de principios del siglo XVIII requería 1.600 ha de árboles para un suministro sostenible (recuadro 4.22).

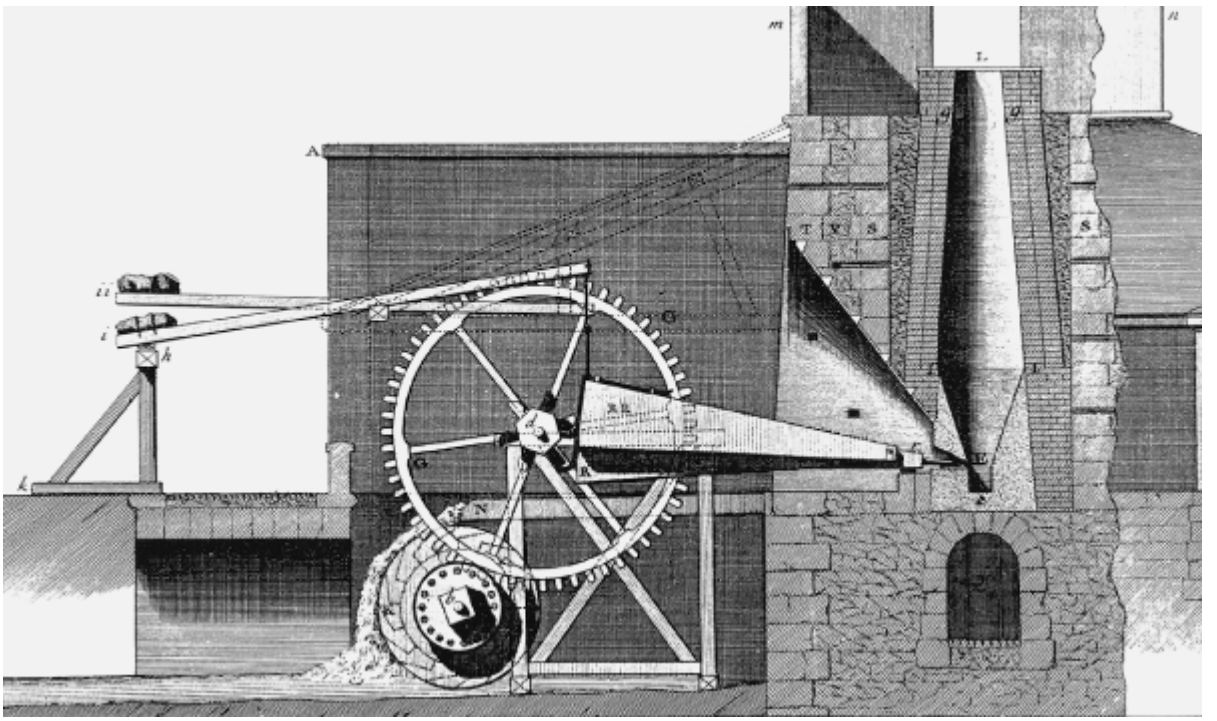


Figura 4.25 Alto horno de carbón vegetal de mediados del siglo XIX, con fuelle accionado por rueda hidráulica con canal de alimentación superior. Fuente: *Enciclopedia* (Diderot y D'Alembert 1769-1772).

El consumo nacional total de madera para la fabricación de hierro a base de carbón vegetal puede estimarse con cierta precisión para la Inglaterra de principios del siglo XVIII (antes de que la industria comenzara a utilizar coque): un suministro sostenible tuvo que requerir la tala de 1.100 km^2 de arboledas o bosques de vástagos o madera de crecimiento natural (recuadro 4.22). Gracias a la riqueza natural de sus bosques, un siglo más tarde Estados Unidos no tuvo ningún problema para fundir hierro con carbón vegetal, pero a principios del siglo XX habría sido imposible, y realmente fue el coque el que permitió al país convertirse en el mayor productor mundial de arrabio (recuadro 4.23).

Mientras duró el consumo de madera, las comunidades rodeadas de molinos y forjas de hierro tradicionales lo pasaron muy mal. Ya en 1548 los angustiados habitantes de Sussex se preguntaban cuántos pueblos podrían desaparecer si los hornos seguían funcionando: no

tendrían madera para construir casas, molinos de agua, ruedas, barriles, muelles y cientos de otras cosas. De hecho, pidieron al rey que cerrara muchos molinos (Straker, 1969; Smil, 2016). El papel de la energía como factor limitante en la fundición tradicional de hierro es, por tanto, indudable. Sabiendo que un único horno podía consumir un círculo de bosque de 4 km de radio al año, es fácil entender el impacto acumulativo que podían tener decenas de hornos a lo largo de periodos de muchas décadas.

RECUADRO 4.22

Consumo de combustible de un alto horno inglés del siglo XVIII

Los altos hornos ingleses de principios del siglo XVIII funcionaban solo entre octubre y mayo y durante ese periodo su producción media era de solo 300 t de arrabio (Hyde, 1977). Suponiendo que consumieran 8 kg de carbón vegetal por kg de hierro y 5 kg de madera por kg de carbón vegetal, el consumo anual de un solo horno pudo ser de 12.000 t de madera. Después de 1700, prácticamente no podía contarse con el crecimiento natural de los bosques: la madera provenía de la tala de rotaciones de 10-20 años de vástagos de madera dura, cuya masa anual cosechable pudo ser de 5-10 t/ha. Si suponemos una productividad media de 7,5 t/ha, habrían sido necesarias 1.600 ha de madera dura para su funcionamiento perpetuo. A modo de comparación, un gran horno inglés del siglo XVII (mucho menos eficiente) en el Bosque de Dean consumió 5.300 ha de vástagos, mientras que la pequeña fundición de Wealden requirió 2.000 ha para cada pareja horno/forja (Crossley, 1990).

RECUADRO 4.23

Consumo energético de la producción de hierro británico y estadounidense

En 1720, 60 hornos británicos produjeron 17.000 t de arrabio y consumieron 680.000 t de madera (40 kg de madera por kg de metal). La forja del metal para la producción de 12.000 t de barras añadió otras 150.000 t de madera (2,5 kg de carbón vegetal por kg de barra), situando el consumo anual total en

830.000 t de madera de carbón vegetal. Con una productividad media de 7,5 t/ha, habrían sido necesarios 1.100 km^2 de bosques adultos y vástagos para una cosecha sostenible.

El primer dato disponible de producción nacional de arrabio en Estados Unidos es de 1810: se consumió 1 Mt de madera para una producción de 49.000 t de metal (5 kg de carbón vegetal o al menos 20 kg de madera por kg de metal caliente). En esa época, toda la madera podía provenir de la tala de antiguos bosques naturales de madera dura, un ecosistema muy rico que almacenaba 250 t/ha (Brown, Schroeder y Birdsey, 1997), y si se hubiera utilizado toda la fitomasa terrestre para producir carbón vegetal, se hubieran tenido que talar 4.000 ha/año (un cuadrado de 6,3 km de lado) para mantener ese nivel de producción. Los ricos bosques estadounidenses podían soportar una punción aún mayor, y, de hecho, en 1840 todo el hierro estadounidense todavía se fundía con carbón vegetal. Con todo, después se dio una rápida transición al coque, que en 1880 se utilizaba para el 90% de la producción de hierro, y el progresivo aumento de la producción de hierro no hubiera podido basarse en el carbón vegetal: en 1910 —con una producción de hierro de 25 Mt, e incluso con cargas muy reducidas de 1,2 kg de carbón vegetal y 5 kg de madera por kg de metal caliente— hubieran sido necesarias 125 Mt/año de madera.

Incluso si suponemos un elevado incremento medio de los renovales de 7 t/ha, un suministro sostenible de madera habría requerido una cosecha anual de 180.000 km^2 de bosque, una superficie igual a la de Missouri (o un tercio de Francia). Obviamente, ni siquiera un país tan abundante en bosques como Estados Unidos podía permitirse el lujo de sostener la fundición de mineral de hierro con carbón vegetal.

Este efecto se concentró necesariamente en regiones montañosas boscosas. Allí, la distancia de transporte del carbón con animales de tiro se mantuvo muy baja (restricción agravada por la fragilidad del combustible), mientras que la alimentación de los hornos y fuelles de forja se satisfacía fácilmente instalando ruedas hidráulicas. La cercanía del carbón también era importante, pero como el peso del mineral solo representaba una pequeña fracción del peso del carbón, era más fácil de transportar. La deforestación fue el precio medioambiental inevitable que tuvo que pagarse para fabricar clavos, hachas y

herraduras, así como cotas de malla, lanzas, pistolas y balas de cañón. La rápida expansión de la fabricación de hierro y el suministro limitado de madera doméstica condujo a una fuerte crisis energética en Gran Bretaña durante el siglo XVII. La situación se vio agravada por la elevada demanda de madera para la construcción naval, en pleno florecimiento.

Si bien en muchas sociedades preindustriales el hierro era relativamente abundante, el acero solo estaba disponible para usos especiales. Al igual que el hierro fundido, el acero también es una aleación, pero solo contiene 0,15-1,5% de carbono y generalmente una pequeña cantidad de otros metales (principalmente níquel, manganeso y cromo). Se trata de un mejor metal que el hierro fundido o que cualquier aleación de cobre: los mejores aceros para herramientas tienen una resistencia a la tracción un orden de magnitud más elevada que la del cobre o el hierro (Oberg *et al*., 2012; recuadro 4.21). Algunas técnicas de fundición antiguas y rudimentarias producían directamente acero de calidad relativamente alta, pero solo en pequeñas cantidades. Los aceristas tradicionales de África Oriental utilizaban hornos de escoria y barro alimentados con carbón vegetal, circulares y cónicos, bajos (<2 m) y construidos encima de un pozo de hierba carbonizada (*over a pit of charred grass*). Ocho hombres operando fuelles de piel de cabra conectados a *tuyères* de cerámica podían alcanzar temperaturas de más de 1.800 °C (Schmidt y Avery, 1978). Este método, aparentemente conocido desde los primeros siglos de la Era común, permitió producir directamente pequeñas cantidades de acero al carbono de calidad media.

Sin embargo, las sociedades preindustriales siguieron sobre todo dos grandes rutas efectivas para fabricar acero: la carburización del hierro forjado y la descarburización del hierro fundido. La primera técnica, más antigua, implicaba un calentamiento prolongado del metal en carbón vegetal, lo que daba lugar a una difusión gradual de carbono hacia el interior. De este modo, se generaba una capa de acero duro sobre un núcleo de hierro más blando sin necesidad de

forjado. Se trataba de un material perfecto para rejas de arado y armaduras. El forjado repetido distribuía el carbono absorbido de manera bastante uniforme y producía excelentes hojas de espada. La descarburización —la eliminación del carbono del hierro fundido mediante oxigenación— ya existía en China durante la dinastía Han, y permitía producir metal para aplicaciones tan exigentes como la construcción de cadenas de puentes colgantes.

La creciente disponibilidad de hierro y acero condujo gradualmentea profundos cambios sociales. Sierras de hierro, hachas, martillos y clavos aceleraron la construcción de casas y mejoraron su calidad. Los utensilios de cocina de hierro y una variedad de otros objetos y herramientas —desde anillos hasta rastrillos, pasando por rejillas y ralladores— facilitaron la cocina y la gestión de la casa. Las herraduras de hierro y las rejas de arado fueron fundamentales para intensificar los cultivos. Las cotas de malla flexibles, los cascos y las espadas pesadas, así como más tarde las pistolas, las balas de cañón de hierro y las armas de fuego más fiables, revolucionaron la guerra por completo. Estos cambios se aceleraron enormemente con la introducción de la fundición de hierro a base de coque y la aparición de la máquina de vapor.

GUERRA

Los conflictos armados siempre han tenido un papel importante en la historia: suelen movilizar cantidades extraordinarias de energía y han dado lugar a las formas más concentradas y devastadoras de liberación de poder destructivo. Además, el suministro básico de energía (alimentos o combustible) de las poblaciones expuestas a un conflicto armado no solo se ve afectado durante el conflicto (adquisición de alimentos para los ejércitos en campaña, destrucción de cosechas, interrupción de la actividad económica normal debido a la movilización de personas jóvenes y los daños infligidos a los

asentamientos y las infraestructuras), sino también mucho tiempo después de que este termine.

En todos los conflictos históricos se han utilizado armas, pero las armas no son las principales fuentes de energía de la guerra: excepciones aparte, hasta la invención de la pólvora las principales fuentes de energía de la guerra fueron los seres humanos y los animales. La primera excepción fue el uso de material incendiario. La segunda, por supuesto, el uso de velas impulsadas por el viento para acelerar y facilitar maniobras navales. Las armas mecánicas tradicionales —de mano (dagas, espadas, picas) y proyectiles (lanzas, flechas, grandes objetos utilizados como proyectiles de catapulta)— fueron diseñadas para maximizar el daño físico mediante la liberación repentina de energía cinética. La invención de la pólvora introdujo una nueva fuente de energía mucho más poderosa. La reacción explosiva de los productos químicos propulsó proyectiles más deprisa y más lejos y aumentó su impacto destructivo. Durante siglos, este impacto estuvo limitado por el torpe diseño de las armas personales (rifles de avancarga y retrocarga), pero la pólvora ganó cada vez más importancia como propulsor de balas de cañón.

Energía humana y animal

La guerra terrestre prehistórica y los conflictos de la Antigüedad y la Alta Edad Media fueron alimentados únicamente por energía humana y animal. Los soldados empuñaban dagas, hachas y espadas en combate cuerpo a cuerpo, a pie o a caballo. Usaban picas y lanzas, y también arcos y ballestas (que tanto los chinos como los griegos usaban desde el siglo IV a. C.) para disparar flechas cuyo impacto hería y mataba enemigos desprotegidos a una distancia de 100-200 m. La antigüedad de la guerra con arco está atestiguada por el jeroglífico egipcio para soldado, que representa un hombre arrodillado sobre su rodilla izquierda, un arco en su brazo derecho extendido y una aljaba en su hombro izquierdo (Budge, 1920). Los animales y las personas también giraban los cabrestantes de grandes catapultas y

aprovechaban la gravedad apalancada para lanzar grandes proyectiles en fundíbulos para romper las murallas de una ciudad o destruir las fortificaciones de un castillo.

Las armas de mano podían causar heridas graves. Los golpes y cortes bien asestados podían matar al instante, pero requerían una mezcla de fuerzas de combate. Obviamente, su potencia dependía de los músculos de cada persona. Los arcos y las flechas permitían la separación de las fuerzas de combate. Los mejores arqueros eran admirablemente precisos en distancias relativamente largas, aunque durante las batallas de tiro con arco se desperdiciaban muchísimas flechas debido a la selección inexacta de objetivos y la energía cinética relativamente baja de las flechas ligeras (recuadro 4.24). Asimismo, el tiempo de recarga entre descargas sucesivas limitaba la magnitud y frecuencia de las lesiones que podían infligir los arqueros. Los límites humanos también condicionaban el movimiento de las tropas, aunque en realidad el tren de suministro, que incluía animales de movimiento lento, solía ser el factor limitante en términos de velocidad de desplazamiento.

RECUADRO 4.24

La energía cinética de espadas y flechas

Las pesadas espadas medievales nunca superaban los 2 kg y solían pesar menos de 1,5 kg. La energía cinética aumenta con el cuadrado de la velocidad: sería de solo 9 J para una espada de 2 kg manejada torpemente a solo 3 m/s y 75 J para una katana japonesa de 1,5 kg (la espada tradicional japonesa, curva, delgada, de 60-70 cm de largo y un solo filo) en manos de un experto espadachín a 10 m/s. Parece un resultado bastante bajo, pero el impacto del corte era muy concentrado y estaba dirigido a una parte estrecha del cuerpo (cuello, hombro, brazo), mientras que los golpes de empuje penetraban profundamente en los tejidos blandos del cuerpo.

Una típica flecha ligera (20 g) en manos de un buen arquero dotado de un arco compuesto podía volar a una velocidad de hasta 40 m/s (Papa, 1923) y su energía cinética alcanzar 16 J. Una vez más, puede parecer un resultado

modesto, pero hay que recordar que el impacto del proyectil es básicamente puntiforme y, por tanto, profundamente penetrante: las flechas con punta de pedernal o metal penetraban fácilmente en una cota de malla cuando se disparaban desde distancias de hasta 40-50 m, y bien dirigidas podían matar a más de 200 m de distancia.

Las dos máquinas militares más potentes de la Antigüedad y la temprana Edad Media se basaban en la ventaja mecánica de una palanca. Las catapultas eran grandes arcos mecanizados que se accionaban mediante la liberación repentina de la deformación elástica de cuerdas o elásticos retorcidos (figura 4.26). Se utilizaron desde el siglo IV a. C. (Soedel y Foley, 1979; Cuomo, 2004). Disparaban flechas y arrojaban objetos. Las manganas, utilizadas en el asedio de las ciudades, eran palancas de tercera clase: su base era un fulcro, la fuerza era proporcionada por bandas de tensión y la carga era lanzada a una velocidad inalcanzable para el despliegue directo de los músculos humanos. Con todo, la típica catapulta medieval, que lanzaba piedras de 15-30 kg, solo podía dañar las murallas de una ciudad de manera limitada.

En cambio, los fundíbulos, inventados en China antes del siglo III a. C., eran palancas de primera clase con vigas que giraban alrededor de un eje y una baldosa de proyección cargada en el extremo de un brazo de lanzamiento que tenía 4-6 veces la longitud del brazo corto (Hansen, 1992; Chevedden *et al*., 1995). Los fundíbulos más antiguos y pequeños eran operados por hombres que tiraban de cuerdas atadas al brazo corto; más tarde, fundíbulos más grandes con enormes contrapesos pudieron lanzar objetos de cientos de kilogramos de peso (con récords que pudieron superar una tonelada) más allá del alcance de la artillería medieval temprana. También se utilizaron en la defensa contra los asedios: se colocaban en las altas murallas de los castillos o las ciudades y lanzaban grandes piedras a cualquier ariete de asedio a su alcance.

En la guerra preindustrial los animales cumplían dos funciones: facilitaban ataques rápidos y de larga distancia y eran un medio de transporte indispensable que permitía desplegar ejércitos más grandes, cuyos suministros eran transportados por bestias de carga o tiro. En las primeras representaciones registradas de la guerra, los caballos tiran de carros ligeros con ruedas de radios, utilizados por primera vez hacia el 2000 a. C. Ninguna otra innovación militar que precediera al uso de la pólvora fue tan relevante, debido a la combinación de velocidad y posibilidad de ajustes tácticos rápidos, como los arqueros a caballo. Montados en pequeños caballos y disparando flechas con poderosos arcos compuestos, los arqueros a caballo (primero asirios y partos, más tarde macedonios y griegos) fueron una fuerza de combate muy móvil y formidable antes de la introducción de los estribos (Drews, 2004).

Estas sencillas piezas de metal, que proporcionan puntos de apoyo para los jinetes, se utilizaron por primera vez en China a principios del siglo III d. C., antes de difundirse hacia el oeste. Dieron a los jinetes un apoyo y una estabilidad sin precedentes en la silla de montar (Dien, 2000). Sin ellos, un soldado con armadura ni siquiera hubiera podido montar un caballo más grande (y a veces también parcialmente blindado), y desde luego no habría sido capaz de luchar eficazmente con una lanza o una espada pesada mientras estaba de espaldas. Esto no significa que los jinetes equipados con estribos obtuvieran una fácil supremacía en la batalla. Los jinetes asiáticos, sin armadura y montados en caballos pequeños pero extraordinariamente resistentes, constituyeron unidades de combate especialmente eficaces: podían moverse a gran velocidad y disfrutaban de una maniobrabilidad sin igual.

Esta combinación llevó a los jinetes mongoles de Asia oriental al centro de Europa entre 1223 y 1241 (Sinor, 1999; Atwood, 2004; mayo de 2013) y permitió que varios imperios de las estepas sobrevivieran en Asia central hasta el comienzo de la era moderna (Grousset, 1938; Hildinger, 1997; Amitai y Biran, 2005; Perdue,

2005). La serie más espectacular de incursiones de larga distancia de jinetes acorazados llevó a los cruzados de muchos países europeos al Mediterráneo oriental, donde establecieron (entre 1096 y 1291) un gobierno temporal sobre las fluctuantes zonas costeras e interiores de lo que hoy es Israel y partes de Jordania, Siria y Turquía (Grousset, 1970; Holt, 2014).

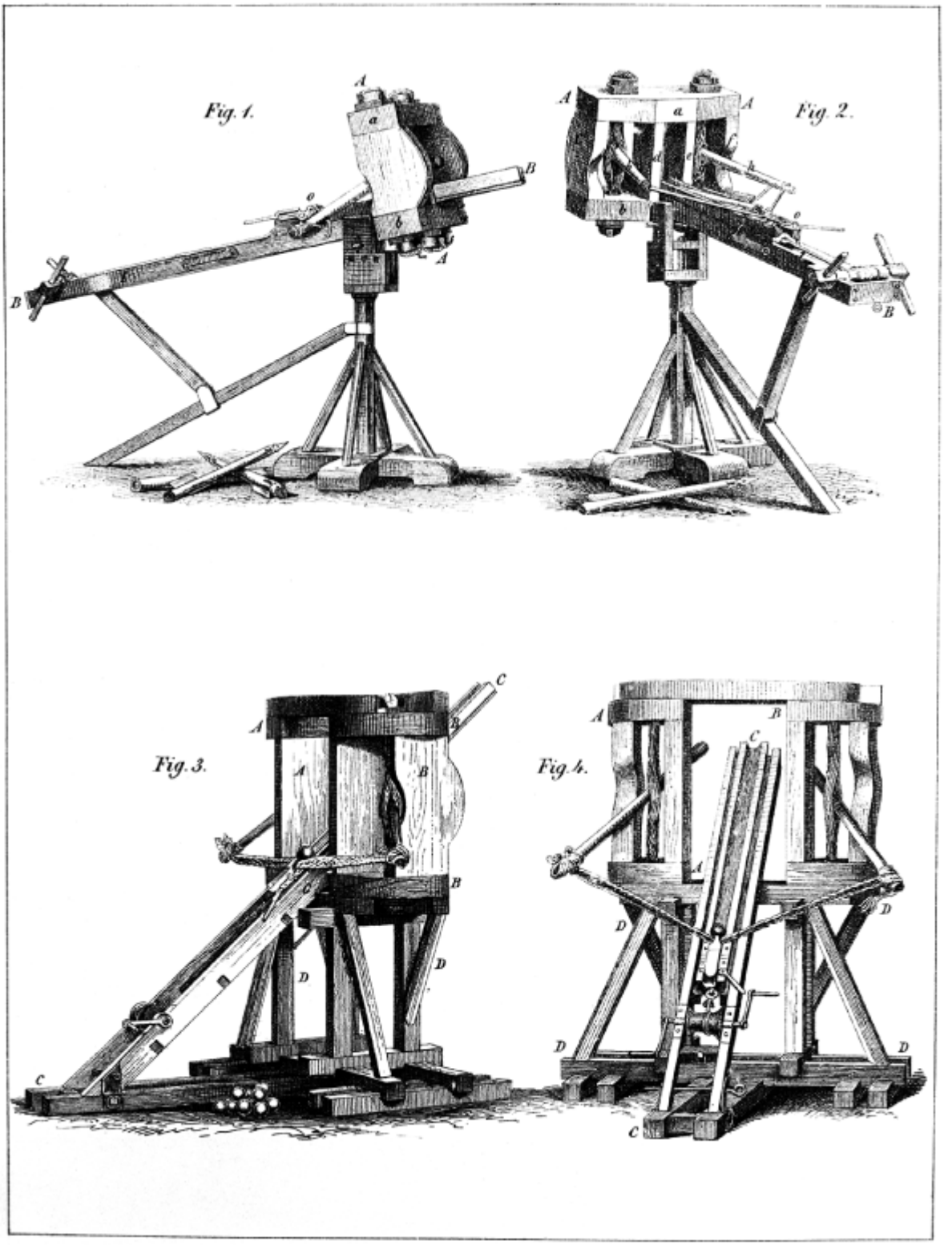


Figura 4.26 Catapultas romanas (Corbis).

Los caballos siguieron siendo importantes en todos los grandes conflictos occidentales de la Edad Moderna (1500-1800), así como en las guerras napoleónicas, tanto para las unidades de caballería como para los carros pesados y la artillería de campo. Los grandes ejércitos que se alejaban de sus bases de operaciones dependían de los animales para desplazar los suministros: en terrenos difíciles se utilizaban animales de carga (burros, mulos, caballos, camellos, llamas), mientras que los animales de tiro (principalmente bueyes y en Asia también elefantes) tiraban de carros de suministros y cañones de campo cada vez más pesados. El inmenso consumo energético de las grandes campañas militares, muy dependientes de la fuerza de tiro, está bien ilustrado por la lista de provisiones y animales que Prusia oriental acordó suministrar a los ejércitos de Napoleón para su invasión de Rusia en 1812 (recuadro 4.25). Sin los 44.000 bueyes que se utilizaron para tirar de los suministros, el ejército no podría haber llegado muy lejos.

Los conflictos armados occidentales posteriores a 1840 fueron los primeros en utilizar una fuente de energía moderna y artificial, la máquina de vapor, para desplazar tropas y animales y trasladarlos al frente de batalla por medio de trenes (o, en el caso de las tropas enviadas a las guerras coloniales en otros continentes, a los puertos de embarque para ser cargados en buques de vapor. Con todo, el movimiento en el campo de batalla siguió siendo impulsado únicamente por músculos humanos y animales. Y aunque durante la Primera Guerra Mundial se utilizó una nueva fuente de energía mecánica e inanimada (motores de combustión interna para camiones, tanques, ambulancias y aviones), los caballos siguieron siendo indispensables en o cerca de las zonas de combate. A finales de 1917, los ejércitos británicos en el frente occidental contaban con 368.000 caballos (dos tercios para el transporte de suministros, el resto para unidades de caballería), y aunque los avances de la Wehrmacht en Francia (en la primavera de 1940) y Rusia (en el verano de 1941) se citan a menudo como ejemplos de libro de texto de la guerra rápida

mecanizada liderada por tanques, Alemania movilizó 625.000 caballos para su invasión de Rusia. Al final de la guerra, la Wehrmacht tenía alrededor de 1,25 millones de animales (Edgerton, 2007). De manera similar, los ejércitos soviéticos desplegaron cientos de miles de caballos en su avance desde Moscú y Stalingrado hasta Berlín (figura 4.27). Así, el heno y la avena siguieron siendo un material estratégico hasta el final de la Segunda Guerra Mundial.

RECUADRO 4.25

Suministros y animales prusianos para la invasión rusa

Abrir el camino hacia Rusia a Napoleón: así es como Felipe Pablo, conde de Ségur (1780-1873), uno de los jóvenes generales de Napoleón y quizás el más famoso cronista de la desastrosa invasión rusa, describió la contribución prusiana:

> Mediante este tratado, Prusia se comprometió a suministrar doscientos mil quintales de centeno, veinticuatro mil de arroz, dos millones de botellas de cerveza, cuatrocientos mil quintales de trigo, seiscientos cincuenta mil de paja, trescientos cincuenta mil de heno, seis millones de fanegas de avena, cuarenta y cuatro mil bueyes, quince mil caballos, tres mil seiscientas carretas, con arreos y conductores, cada una de ellas con una carga de mil quinientos pesos y, finalmente, hospitales provistos de todo lo necesario para veinte mil enfermos. (Ségur, 1825: 17)

Explosivos y armas

Las únicas energías inanimadas que se utilizaron en la guerra antes de la aparición de la pólvora fueron materiales incendiarios preparados combinando azufre, asfalto, petróleo y cal viva. Se fijaban en puntas de flecha o se lanzaban a objetivos a través de fosos y paredes desde catapultas y fundíbulos. Los orígenes de la pólvora tienen que ver con la amplia tradición de alquimistas y metalúrgicos chinos (Needham *et al*., 1986; Buchanan, 2006). Trabajaban con sus tres ingredientes —

consistían en solo un 50% de salitre y no eran realmente explosivas—. Más adelante las mezclas capaces de detonar se asentaron en un 75% de salitre, un 15% de carbón y un 10% de azufre.

A diferencia de la combustión ordinaria, en la que el oxígeno debe ser extraído del aire circundante, la ignición del KNO_3 proporciona fácilmente su propio oxígeno, de tal manera que la pólvora produce rápidamente una expansión de unas 3.000 veces su volumen en gas. Cuando se confina y dirige apropiadamente en cañones estriados (ánima rayada), una pequeña cantidad de pólvora puede impartir a las balas una energía cinética de un orden de magnitud mayor que la de una flecha de ballesta pesada utilizada para propulsar proyectiles pesados, mientras nitrato de potasio (KNO_3, salitre), azufre y carbón vegetal— mucho antes de empezar a combinarlos—. La primera fórmula incipiente de la pólvora proviene de mediados del siglo IX; en 1040 se publicaron instrucciones claras para su preparación. Las primeras mezclas que cargas más grandes pueden impulsar proyectiles pesados mediante artillería de campo. Así pues, no es sorprendente que la difusión y el perfeccionamiento de las armas de fuego y los cañones fueron bastante rápidos tras su introducción inicial.

Figura 4.27 La caballería soviética en la Plaza Roja de Moscú, el 7 de noviembre de 1941, una semana antes del comienzo de la ofensiva alemana para llegar a Moscú (Corbis).

El desarrollo de la artillería comenzó en China en el siglo X, con el uso de lanzas de fuego. Se trataba de tubos de bambú (y más tarde metal) que expulsaban trozos de materiales. Más adelante se convirtieron en simples cañones de bronce que lanzaban piedras con escasa precisión. Las primeras armas de pólvora de verdad aparecieron en China antes de finales del siglo XIII y en Europa unas décadas más tarde (Wang, 1991; Norris, 2003). La presión de los frecuentes conflictos armados dio lugar a un ritmo de innovación muy rápido y condujo a la creación de armas más poderosas y más precisas. En 1400, los cañones más largos ya medían 3,6 m y tenían un calibre de 35 cm; el cañón Mons Meg, construido en Francia en 1499 y donado a Escocia, medía 4,06 m, pesaba 6,6 t y podía disparar un proyectil de 175 kg (Gaier, 1967). El poder de destrucción aumentó con el reemplazo progresivo de las bolas de piedra por proyectiles de hierro.

Las implicaciones estratégicas de la guerra con pólvora fueron inmensas tanto en la tierra como en el mar. No había necesidad de organizar prolongados y a menudo desesperados asedios de castillos aparentemente inexpugnables. La combinación de artillería precisa y balas de hierro los hacía indefendibles. La posibilidad de destruir sólidas estructuras de piedra desde lejos, mucho más allá del alcance de los arqueros, puso fin al valor defensivo de los castillos y ciudades amuralladas tradicionales, mientras que la construcción durante la Edad Media de fortalezas relativamente compactas con gruesos muros de piedra fue sustituida por nuevos diseños de polígonos en forma de estrella de baja dispersión con enormes terraplenes de tierra y zanjas de agua.

Estos proyectos consumieron muchísimos materiales y energía. Las fortificaciones de Longwy, en el noreste de Francia, el mayor proyecto del famoso ingeniero militar francés Sébastien Vauban (1633-1707), requirió el traslado de 640.000 m^3 de roca y tierra (un cuarto del volumen de la Gran Pirámide de Guiza) y la colocación de 120.000 m^3 de mampostería (M. S. Anderson, 1988). Pero también pasaron de moda cuando en el siglo XVIII surgió un tipo de guerra mucho más móvil y los asedios se volvieron menos frecuentes. Durante las guerras napoleónicas, los cañones ligeros de Gribeauval (incluido el «cañón de 12 libras», que disparaba proyectiles de 5,4 kg y pesaba algo menos de 2 t, en comparación con las casi 3 de los cañones británicos) facilitaron mucho las maniobras más rápidas (Chartrand, 2003).

En los mares, los buques cañoneros (equipados con otras dos innovaciones chinas, la brújula y un buen timón) se convirtieron en el principal estandarte de la supremacía técnica europea y la herramienta de la expansión agresiva de larga distancia durante buena parte del periodo de expansión colonial. Su dominio terminó a partir de los años 1820 con la introducción del motor de vapor marino. En las aguas del continente europeo, los cañones de largo alcance dieron a los capitanes ingleses una ventaja decisiva sobre la Gran Armada española en 1588 (Fernández-Armesto, 1988; Hanson, 2011). Un

siglo más tarde, los grandes Men-of-War (MOW) se equipaban con hasta 100 cañones, mientras que los barcos británicos y holandeses enfrentados durante la batalla de La Hogue en 1692 sumaban un total de 6.756 cañones (M. S. Anderson, 1988). La descarga concentrada de energía destructiva alcanzó niveles que no fueron superados hasta mediados del siglo XIX con la introducción de pólvoras a base de nitrocelulosa (durante la década de 1860) y dinamita (patentada por Alfred Nobel en 1867).

5

COMBUSTIBLES FÓSILES, ELECTRICIDAD PRIMARIA Y ENERGÍAS RENOVABLES

En esencia, ninguna civilización terrestre puede ser otra cosa que una sociedad solar, es decir, dependiente de la radiación del sol, que posibilita la existencia de una biosfera habitable y produce todos los alimentos y la madera que necesitamos. Las sociedades preindustriales utilizaron la energía solar tanto de manera directa, como radiación entrante (insolación) —toda vivienda ha sido siempre una vivienda solar, calentada pasivamente—, como de manera indirecta. Los usos indirectos incluyeron el cultivo de campos y árboles (para producir frutas, nueces, aceite, madera o combustible) y la recolección de fitomasa natural arbórea, herbácea y acuática, así como la conversión del viento y el agua en energía mecánica útil.

Los flujos de viento y agua son transformaciones casi inmediatas de la radiación solar: los gradientes de presión atmosférica surgen rápidamente por el calentamiento diferencial de los relieves de la Tierra, y la evaporación y la evapotranspiración impulsan continuamente el ciclo global del agua. La radiación solar se convierte en alimentos y pienso y en biocombustibles cuyo tiempo de transformación oscila entre unos días (para el estiércol animal) y unos meses (90-180 días para la mayoría de residuos de cultivo). Los

animales domésticos apenas tardan unos pocos años en alcanzar la edad de trabajar, mientras que en las sociedades tradicionales los niños ayudaban en el trabajo de los adultos desde los 5-6 años. Cuando se empezaron a talar árboles adultos para quemar madera (o para fabricar carbón vegetal), el tiempo de transformación de la radiación solar en energía útil alcanzó varias décadas (y más tarde, cuando sierras más grandes hicieron posible la tala de árboles gigantes en bosques tropicales primarios, varios siglos).

Los orígenes de los combustibles fósiles también se hallan en la transformación de la radiación solar: la turba y el carbón mineral surgieron de la lenta alteración de las plantas muertas (fitomasa) y los hidrocarburos de transformaciones más complejas del fitoplancton unicelular marino y lacustre (principalmente cianobacterias y diatomeas), el zooplancton (principalmente foraminíferos) y algunas algas, invertebrados y peces (Smil, 2008a). La presión y el calor fueron los procesos de transformación dominantes y duraron entre unos pocos miles de años para la turba más joven y cientos de millones de años para los carbones duros (antracita). Este origen determina su alto contenido de carbono, que, combinado con el bajo contenido de agua e impurezas incombustibles, se traduce en altas densidades de energía (recuadro 5.1).

Sin embargo, solo una pequeña fracción del carbono de la biomasa sedimentada inicialmente se transformó en combustible fósil (Dukes, 2003). Primero, hasta un 15 % del carbono de las plantas se transformó en turba: de ese 15 %, hasta un 90 % pudo preservarse como carbón; y de todo ese carbón, en las vetas gruesas de las minas a cielo abierto pudo extraerse hasta un 95 %. Como resultado, solo hasta un 13 % del carbono vegetal original antiguo pudo extraerse como carbón mineral. Inversamente, esto significa que unas 8 unidades de carbono vegetal se transformaron en carbón mineral comercializado (el rango básicamente es de 5-20 unidades). En cambio, el factor de recuperación de carbono para el petróleo crudo y el gas natural es mucho menor. Estos combustibles surgieron de

organismos enterrados en sedimentos marinos y lacustres, y la producción de hidrocarburos fósiles recupera, en el mejor de los casos, el 1 % —y generalmente solo el 0,01 %— del carbono presente inicialmente en la biomasa cuya transformación da lugar al petróleo y el gas. Esta tasa de recuperación del 0,01 % significa que fueron necesarias 10.000 unidades de carbono para producir una unidad de carbono vendida como petróleo crudo o gas natural.

Con todo, una sociedad que utiliza los combustibles fósiles como meros sustitutos de los usos tradicionales de la fitomasa —es decir, que los quema de manera ineficiente solo para producir calor y luz— se correspondería más bien a una versión más rica de la Europa o la China del siglo XVIII. La transición hacia los combustibles fósiles también conllevó dos clases de mejoras cualitativas fundamentales cuya suma y combinación constituyen los fundamentos energéticos del mundo moderno. El primer tipo de avance fue la invención, el desarrollo y la progresiva difusión masiva de nuevas formas de convertir los combustibles fósiles: se introdujeron nuevos motores primarios —primero máquinas de vapor y después motores de combustión interna y turbinas de vapor y gas— y se idearon nuevos procesos para transformar los combustibles crudos, incluidos la producción de coque metalúrgico a partir de carbón, el refinado de los crudos para producir una amplia gama de líquidos y materiales no combustibles, y el uso del carbón y los hidrocarburos como materias primas en nuevas síntesis químicas.

La segunda clase de mejoras consistió en utilizar combustibles fósiles para producir electricidad, un tipo de energía comercial completamente nuevo. Se liberaba calor mediante la combustión de cualquier combustible sólido, líquido o gaseoso para convertir agua en vapor, que a su vez hacía girar un turbogenerador y producía electricidad. Además, desde los inicios de la generación de electricidad también se utilizó la energía cinética del agua (en lugar de la del vapor en expansión) para producir electricidad. Por tanto, la hidroelectricidad es una forma de electricidad primaria (en

contraposición a la electricidad derivada de la quema de combustibles); las adiciones posteriores a esta categoría han incluido la electricidad generada en plantas geotérmicas, por fisión nuclear y, más recientemente, por grandes turbinas eólicas y células fotovoltaicas o radiación solar concentrada.

RECUADRO 5.1

Combustibles fósiles

La masa vegetal contiene un 45-55% de carbono (C), la antracita casi un 100%, los buenos carbones bituminosos más del 85%, la mayoría de petróleos crudos un 82%-84% y el metano (CH4), componente dominante del gas natural, el 75 %. Los carbones bituminosos (la hulla) constituyen de lejos el combustible sólido más abundante y extraído en el mundo. Debido a que casi siempre contienen algo de ceniza y azufre, su combustión genera cenizas volantes y SO_2. Hasta después de la Segunda Guerra Mundial, fueron dos fuentes de contaminación del aire industrial y urbano muy comunes (causaban deposición visible de material particulado, deposición de ácido seco y acidificación de la lluvia) (Smil, 2008a). Los petróleos crudos son mezclas de hidrocarburos complejos cuyo refinado produce gasolinas, combustible de jet (*jet fuel*) y diésel para el transporte, petróleos combustibles para la generación de calor y vapor, lubricantes y materiales de pavimentación. Los gases naturales, que son los combustibles fósiles más limpios de todos, también son los hidrocarburos más ligeros. Los hidrocarburos también pueden producirse a partir de carbón. El gas de alumbrado o «gas ciudad» se utilizó ampliamente para la iluminación durante el siglo XIX, y la gasificación moderna del carbón produce un gas sintético similar a los gases naturales. Los combustibles líquidos sintéticos fueron producidos por primera vez a gran escala en Alemania durante la Segunda Guerra Mundial.

Las densidades energéticas varían ampliamente en los carbones, pero son relativamente uniformes en el caso de los hidrocarburos. El petróleo crudo siempre resulta la mejor fuente de energía: contiene casi el doble de energía por unidad de masa que el carbón bituminoso o hulla común. Las estadísticas internacionales de energía utilizan tres denominadores comunes: el equivalente del carbón estándar (combustible que contiene 29,3 MJ/kg), el equivalente del petróleo (42 MJ/kg) y los valores en unidades energéticas estándar (julios) o en

dos unidades tradicionales, las calorías (cal) y las unidades térmicas británicas (BTU).

Combustible	Densidad energética	
	MJ/kg	MJ/m^3
Carbón		
Antracita	31-33	
Carbón bituminoso	20-29	
Lignita	8-20	
Turba	6-8	
Petróleo crudo	42-44	
Gas natural		29-39

La tendencia a largo plazo es clara: convertir una parte cada vez mayor de combustibles fósiles en electricidad térmica y ampliar la capacidad de generación de electricidad primaria, porque la electricidad es la energía moderna más práctica, versátil y (al menos en el punto de consumo) limpia de todas. En la primera parte de este capítulo describo los avances clave de la gran transición de los combustibles de fitomasa y la energía humana y animal a los combustibles fósiles y los motores primarios mecánicos. En la segunda parte analizo las principales innovaciones técnicas que hay detrás de la eficiencia, la fiabilidad y la asequibilidad características de las sociedades energívoras modernas.

LA GRAN TRANSICIÓN

En algunos países se utilizaron combustibles fósiles (aunque en cantidades relativamente pequeñas) durante siglos antes de la «gran

transición» de la que hablamos. Los ejemplos más conocidos son el uso del carbón mineral en Inglaterra y del carbón y el gas natural en China. Los chinos usaron carbón mineral a pequeña escala industrial durante la dinastía Han, mientras que en Inglaterra, Gales y Escocia existían muchos lugares en los que el carbón afloraba o resultaba fácil de desenterrar, primero durante la dominación romana, en pequeñas cantidades, y después durante la Edad Media, en cantidades más importantes. Pero como señaló Nef (1932: 12):

> Hasta el siglo XVI el carbón casi nunca se utilizó, ni en la chimenea ni en la cocina, a más de 1-2 km de los afloramientos, e incluso dentro de ese radio solo lo utilizaban los pobres que no podían permitirse comprar madera.

El carbón mineral fue el combustible fósil dominante durante la transición europea. La excepción más notable fueron los Países Bajos, que durante los siglos XVII y XVIII, cuando eran una de las economías más influyentes del continente, se alimentaron principalmente de turba local. El alcance del uso de la turba queda ilustrado por la siguiente estimación de De Zeeuw (1978): de las 175.000 ha de turberas altas que existen en Países Bajos, solo 5.000 permanecieron en un estado más o menos intacto. En Estados Unidos y Canadá la transición también comenzó con el carbón, pero ambos países pasaron antes y más rápido al petróleo y el gas natural (Smil, 2010a). Asimismo, Rusia fue uno de los primeros productores de petróleo comercial a gran escala, y más tarde también supo aprovechar sus enormes recursos de gas natural.

Durante el siglo XIX, casi toda Europa redujo su dependencia hacia los combustibles tradicionales de fitomasa a niveles muy bajos. Este proceso sigue en marcha en muchos países pobres. Los patrones, así como los combustibles, difieren. Conviene utilizar el plural para subrayar su variabilidad. Los carbones, los petróleos crudos y los gases naturales tienen una amplia gama de propiedades (véase

recuadro 5.1). El calor que libera su combustión puede utilizarse directamente para cocinar, calentar o fundir metales e indirectamente para alimentar varios tipos de motores. El motor de vapor se convirtió en el principal motor primario del siglo XIX. Los motores de combustión interna y las turbinas de vapor comenzaron a comercializarse a pequeña escala durante la década de 1890. Antes de 1950, los motores de gasolina y diésel ya eran los más habituales en el transporte, mientras que las turbinas de vapor se habían consolidado como el principal método de generación de electricidad a gran escala (Smil, 2005); el uso generalizado de turbinas de gas (estacionarias para la generación de electricidad o como propulsores de aviones y barcos) no se produjo hasta después de 1960 (Smil, 2010a).

Algunos estudios recientes sobre las transiciones energéticas subrayan sus numerosos puntos en común, así como los principales factores que las han favorecido o frenado (Malanima, 2006; Fouquet, 2010; Smil, 2010a; Pearson y Foxon, 2012; Wrigley, 2010, 2013). Estas transiciones van desde periodos prolongados de experimentación seguidos por una fase de crecimiento rápido y aumento de escala (Wilson, 2012), hasta transiciones considerablemente más tempranas y rápidas en contextos de pequeña escala (Rubio y Folchi, 2012). Por otra parte, algunos países más pequeños se saltaron la etapa del carbón (incluso cuando disponían de abundantes depósitos) y pasaron rápidamente a la del petróleo crudo local o, más a menudo, importado. Sea como fuere, el resultado final fue siempre el mismo: un aumento sustancial del consumo de energía primaria per cápita.

Los inicios y la expansión de la extracción de carbón

Los inicios del consumo de carbón se remontan a la Antigüedad, cuando la dinastía Han, en China, lo empleaba sobre todo en la producción de hierro (Needham, 1964). El registro europeo muestra que la primera operación de extracción tuvo lugar en Bélgica en 1113, los primeros envíos a Londres en 1228 y las primeras exportaciones desde la región de Tynemouth hasta Francia en 1325, y que Inglaterra

fue el primer país que intentó pasar de los combustibles vegetales al carbón mineral durante los siglos XVI y XVII (Nef, 1932). Después de 1500, la grave escasez de madera en la región condujo al aumento del coste de la propia madera, la leña y el carbón vegetal. Esta escasez se agravó durante el siglo XVII debido a la creciente demanda de hierro y el enorme consumo de madera para la construcción de barcos, que solo lograron frenarse temporalmente mediante el aumento de las importaciones de hierro en barras y madera (Thomas, 1986). La solución más evidente era aumentar la extracción doméstica de carbón: casi todas las minas de carbón del país se abrieron entre 1540 y 1640.

En 1650, la producción anual de carbón mineral inglés había superado 2 Mt; a principios del siglo XVIII se extraían 3 Mt/año y a finales de ese mismo siglo, más de 10 Mt/año. El consumo creciente de carbón requiso solucionar muchos problemas técnicos y organizativos relacionados con la extracción, el transporte y la combustión. El agotamiento de los filones de los afloramientos condujo a la creación de minas más profundas. A finales del siglo XVII, los pozos rara vez superaban los 50 m de profundidad. La barrera de los 100 m fue superada poco después de 1700; la de los 200 m, en 1765, y la de los 300 m, después de 1830. Para entonces, la producción diaria por mina era de 20-40 t (en comparación con solo unas pocas un siglo antes). A mayor profundidad, mayor necesidad de bombeo de agua y energía para la ventilación de la mina y la elevación y distribución del carbón. Para ello se utilizaron ruedas hidráulicas, molinos de viento y caballos. La minería de carbón en sí misma consumía duro trabajo humano.

Los mineros extraían el carbón de las vetas con ayuda de picos, cuñas y mazos en posiciones que iban desde estar de pie hasta arrastrarse por estrechos túneles. Los *putters* llenaban cestas de tela con carbón y las arrastraban en trineos de madera hasta el fondo de los pozos, donde los *onsetters* las colgaban con cuerdas. Los *windsmen* las subían y los *banksmen* las amontonaban en pilas. Los

adultos eran responsables de la mayor parte de la extracción, pero los niños de entre seis y ocho años eran empleados para tareas más ligeras. En muchas minas, algunos de los trabajos más duros eran realizados por mujeres adolescentes o adultas. Tenían que llevar el carbón a la superficie subiendo escaleras empinadas con pesadas cestas en la espalda, atadas con correas en la frente (figura 5.1). En 1812, Robert Bald, ingeniero civil escocés y agrimensor de minerales, publicó una investigación sobre la vida de esas mujeres: merece la pena citarla extensamente tanto por su descripción de las penurias sufridas como por su precisa valoración del esfuerzo físico que estas suponían (recuadro 5.2).

La vívida descripción de Bald también ilustra perfectamente una característica fundamental de la historia de la energía: es un ejemplo impresionante de cómo toda transición hacia una nueva forma de producción de energía debe ser impulsada por el despliegue intensivo de fuentes de energía y motores primarios existentes: la transición de la madera al carbón requirió energía humana, la combustión del carbón impulsó el desarrollo del petróleo y, como veremos en el último capítulo, las células solares fotovoltaicas y las turbinas eólicas actuales requieren energías fósiles para fundir metales, sintetizar plásticos y procesar otros materiales que requieren un gran consumo de energía.

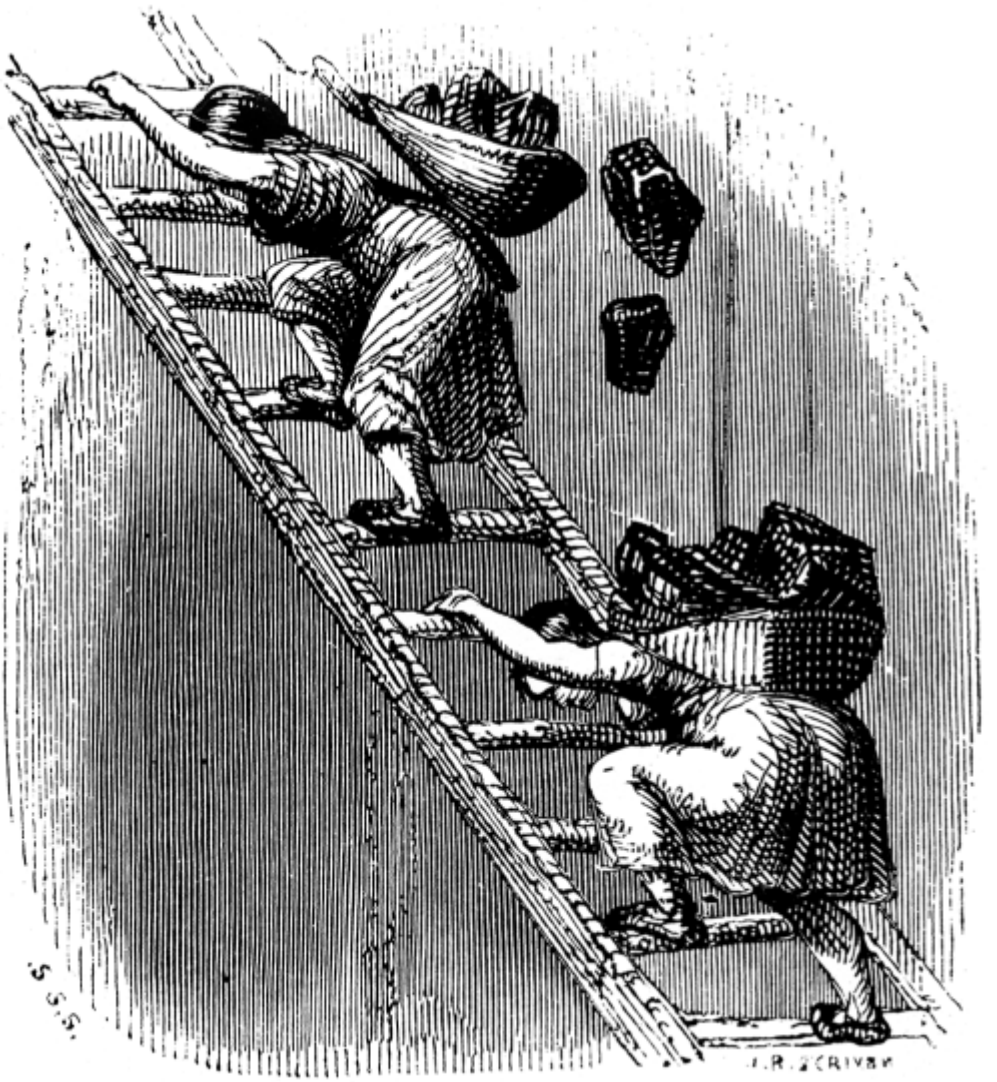


Figura 5.1 Transportadoras de carbón en una mina escocesa a principios del siglo XIX (Corbis).

En las minas más profundas se empleaban caballos para hacer girar los cabrestantes que servían para izar el carbón o bombear agua. Después de 1650 también se utilizaron caballos y burros bajo tierra. Los vagones de mina tirados por caballos (a veces sobre rieles) se utilizaron para distribuir el carbón en distancias más cortas y trasladarlo hasta un río o un puerto donde cargarlo en un bote o un barco. A principios del siglo XVII el consumo de carbón era habitual en los hogares y para calentar las forjas, cocer ladrillos, tejas y cerámica, fabricar almidón y jabón, y extraer sal. Sin embargo, la contaminación

del producto final con impurezas hacía imposible su uso directo para fabricar vidrio, secar malta y, lo más importante, fundir hierro. El problema de la fabricación de vidrio fue el primero en resolverse con la introducción, hacia 1610, de los hornos de reverberación, que reflejaban el calor y en los que las materias primas se calentaban en recipientes cerrados. Los otros dos problemas solo pudieron resolverse con la aparición del coque (véase siguiente sección).

Otro importante uso indirecto del carbón llegó con la producción de gas ciudad mediante la carbonización del carbón bituminoso, es decir, el calentamiento a alta temperatura del combustible en hornos con un suministro limitado de oxígeno (Elton, 1958). Las primeras instalaciones aparecieron de forma independiente en 1805-1806 en las fábricas de algodón inglesas. En 1812 se constituyó una empresa para proporcionar un suministro centralizado de gas para la ciudad de Londres. La eliminación del azufre del gas, una nueva técnica para fabricar tuberías de hierro forjado de pequeño diámetro, mejores retortas y quemadores más eficientes aseguraron la rápida difusión del gas de alumbrado. Cabe subrayar que el consumo de gas ciudad no terminó con la introducción de las bombillas. Un manguito incandescente para gas, patentado en 1885 por Carl Auer von Welsbach, permitió a la industria del gas competir durante algunas décadas con la luz eléctrica.

RECUADRO 5.2

Análisis de la condición de las mujeres que transportan carbón bajo tierra en Escocia, conocidas como PORTEADORAS

Este es el título de uno de los capítulos de *A General View of the Coal Trade in Scotland*, publicado en 1812. He aquí sus principales conclusiones (Bald, 1812: 131-132, 134):

> La madre [...] desciende a la fosa con sus hijas mayores. Cada una lleva una cesta, la deja en el suelo y en ella se carga el carbón. Es tal el peso que

> llevan que suelen ser necesarios dos hombres para levantar la carga y ponerla sobre sus espaldas. [...] La madre sale primero. Lleva una vela encendida entre los dientes. Las muchachas siguen [...] con pasos cansados y lentos. Suben la escalera, deteniéndose de vez en cuando para tomar aliento. [...] Mientras suben, no es raro verlas llorar amargamente debido a la excesiva dureza del trabajo. [...] Se trata de un trabajo cuya dureza está más allá de toda imaginación. [...] El peso del carbón así transportado por una mujer asciende a 4.080 libras al día, aunque con frecuencia se ha alcanzado el récord de 2 t transportadas.
>
> Si suponemos un peso corporal de 60 kg, la elevación diaria de 1,5 t de carbón desde una profundidad de 35 m requeriría por sí misma cerca de 1 MJ. Si incluimos el transporte del carbón en llano o una ligera bajada —dentro de la mina hasta su entrada y afuera desde la salida hasta el punto de distribución —, así como los viajes de regreso, el requisito energético diario sería de 1,8 MJ. Si ahora asumimos una eficiencia laboral del 15%, una porteadora adulta consumiría 12 MJ de energía, con un promedio de 330 W durante una jornada de 10 h. Las mediciones modernas del consumo energético del trabajo pesado han confirmado que es posible trabajar a un ritmo de 350 W durante un turno de ocho horas, pero que es difícil superar ese esfuerzo (Smil, 2008a). Claramente, estas mujeres trabajaban día tras día, y en muchos casos durante muchos años —empezaban a trabajar con siete años y muchas veces seguían haciéndolo hasta que superaban los cincuenta—, cerca del máximo de la capacidad humana.

Fuera de Inglaterra, la difusión de la minería de carbón fue bastante lenta durante el siglo XVIII. La mayor parte de la producción procedió primero del norte de Francia, las regiones de Lieja y el Ruhr y partes de Bohemia y Silesia. La extracción de carbón en América del Norte solo empezó a ser importante a nivel nacional a principios del siglo XIX. Las estadísticas históricas de producción de carbón y las estimaciones disponibles de consumo de leña (mucho menos fiables) a nivel nacional permiten inferir y en ocasiones incluso señalar con cierta precisión el año en que el carbón superó a la madera y aportó más de la mitad del suministro de energía primaria de determinados países (Smil, 2010a). En Inglaterra y Gales esto ocurrió

excepcionalmente pronto y, por tanto, la fecha de estas primeras transiciones energéticas solo puede ser aproximativa.

Para Warde (2007), resulta arbitrario fijar una fecha precisa como punto de inflexión de la transición de la madera al carbón. Aun así, sus reconstrucciones muestran que lo más probable es que el carbón mineral superara a los combustibles de fitomasa como fuente de calor hacia 1620 (o tal vez incluso un poco antes). Hacia 1650, la parte del carbón era de un 65%, hacia 1700 del 75%, hacia 1800 del 90%, y hacia 1850 de más del 98% (los dos últimos porcentajes valen solo para Reino Unido). La supremacía británica del carbón duró otro siglo más: en 1950 el carbón suministraba el 91% de la energía primaria del país e incluso en 1960, el 77%. Como resultado, el carbón mineral representó más del 75% de la producción de energía del país durante 250 años, un periodo de tiempo mucho mayor que en cualquier otro lugar.

Durante los primeros años del gobierno de Napoleón, Francia obtuvo más del 90% de su energía primaria de la madera. En 1850, la proporción todavía era del 75%, y solo bajó por debajo del 50% hacia 1875 (Barjot, 1991). El carbón siguió siendo el combustible dominante en Francia hasta finales de los años 1950, cuando el petróleo importado tomó la delantera. La minería de carbón en Estados Unidos comenzó en 1758 en Virginia. A principios del siglo XIX, Pensilvania, Ohio, Illinois e Indiana ya se habían convertido en estados productores de carbón (Eavenson, 1942). En 1843, el carbón solo representaba un 5% de la energía primaria del país. La rápida progresión de la extracción elevó la cuota hasta el 20% a principios de la década de 1860, y en 1884 el carbón extraído ya contenía más energía que la leña que se consumía en todo el país (Schurr y Netschert, 1960). En 1880, primer año para el cual disponemos de estadísticas históricas en Japón, la madera (y el carbón vegetal) representaban el 85% de la energía primaria; en 1901, como resultado de la rapidísima modernización del país, el carbón mineral ya

representaba más del 50%; el máximo nacional se alcanzó en 1917 con un 77% (Smil, 2010a).

El Imperio ruso, con su inmenso bosque boreal en el norte de Europa y Siberia, era la sociedad maderera por excelencia. Según las series históricas de que disponemos, en 1913 la leña suministraba el 20% de toda su energía primaria (TsSU, 1977). Obviamente, hablamos únicamente de combustible producido comercialmente, que era solo una fracción de la energía necesaria para calentar las viviendas rusas: incluso una casa pequeña requería no menos de 100 GJ/año. De este modo, mi estimación es que en 1913 la madera proporcionaba el 75% de toda la energía del imperio, y que el petróleo y el carbón mineral solo suministraron más de la mitad de toda la energía primaria a principios de la década de 1930 (Smil, 2010a).

La última gran economía en lograr la transición de la fitomasa al carbón vegetal fue China, donde el proceso se retrasó debido a las numerosas crisis del siglo XX: el colapso del dominio imperial en 1911, la prolongada guerra civil entre los comunistas y el Kuomintang (1927-1936, 1945-1950), la guerra con Japón (1933-1945) y décadas de pésima gestión económica maoísta, que incluyeron la Gran Hambruna china (1958-1961), la peor hambruna de la historia, *made in Mao*, y la demente Revolución Cultural (1966-1976). Como resultado de todo ello, los combustibles vegetales representaron más de la mitad de la energía primaria en China hasta 1965; en 1983 representaban menos del 25% y en 2006, menos del 10% (Smil, 2010a).

Del carbón vegetal al coque

La sustitución del carbón vegetal por coque metalúrgico en la fundición de arrabio (o hierro fundido) es sin duda una de las mayores innovaciones técnicas de la era moderna. Trajo consigo dos cambios fundamentales: acabó con la dependencia de la industria respecto a la madera (y, por tanto, respecto a la ubicación de los hornos en regiones

boscosas o sus alrededores) y aumentó mucho la capacidad de los hornos y, por consiguiente, la producción anual. Además, el coque era un mejor combustible metalúrgico. La pirólisis (o destilación destructiva) del carbón —el calentamiento de carbones bituminosos (con bajo contenido de cenizas y sulfuros) en ausencia de oxígeno— produce una matriz de carbono casi puro con una baja densidad aparente (0,8-1 g/cm^3) y una alta densidad energética (31-32 MJ/kg) que también es mucho más fuerte en compresión que el carbón y, por tanto, puede soportar mayores cargas de mineral de hierro y piedra caliza en altos hornos más grandes (Smil, 2016).

Aunque desde principios de la década de 1640 en Inglaterra ya se utilizaba coque para secar la malta (no podía utilizarse carbón porque su combustión generaba hollín y óxidos de azufre), su uso metalúrgico no comenzó hasta 1709 en Coalbrookdale, de la mano de Abraham Darby (1678-1717). La coquización ofrecía un suministro prácticamente ilimitado de un combustible metalúrgico claramente mejor que los otros, pero inicialmente el proceso resultaba derrochador y costoso y por eso su adopción generalizada no se dio hasta después de 1750 (Harris, 1988; King, 2011). Los maestros de fragua ingleses de la primera mitad del siglo XVIII no siguieron inmediatamente el ejemplo de Darby, en buena medida debido a la caída de los precios del hierro forjado, ya que la producción nacional competía con las importaciones suecas. Cuando a mediados de la década de 1750 el mercado mejoró, los maestros de fragua ingleses comenzaron a construir nuevos hornos alimentados con coque, y en 1770 el coque ya se usaba para producir el 46% del hierro británico (King, 2005). Esta auténtica revolución puso fin a la presión insostenible sobre los recursos madereros que se sentía tanto en Reino Unido (véase recuadro 4.22) como en el continente: por ejemplo, en 1820 el 52% de la superficie forestal de Bélgica se utilizaba para producir carbón vegetal metalúrgico (Madureira, 2012).

En Estados Unidos, durante las primeras décadas del siglo XIX la situación no era tan grave (véase recuadro 4.23). En 1840, todo el

arrabio estadounidense todavía se fundía utilizando carbón vegetal. La posterior expansión de la industria trajo consigo una mutación muy rápida, primero a la antracita y luego al coque, que en 1875 ya era dominante. Durante generaciones, el coque se produjo de manera muy poco eficiente en hornos de colmena (*beehive ovens*) cerrados (Sexton, 1897; Washlaski, 2008). La mejora radical se dio con la adopción de hornos de subproductos de coque (*by-product coking ovens*), que recuperan sulfato de amonio como fertilizante, gases ricos en monóxido de carbono como combustible y productos químicos (alquitrán, benceno y tolueno) como materias primas. Empezaron a usarse en Europa en 1881 y en Estados Unidos en 1895 y sus diseños mejorados siguen siendo el pilar de la coquización moderna (Hoffmann, 1953; Mussatti, 1998).

Los primeros altos hornos de coque eran tan altos (8 m) y voluminosos (<17 m^3) como los grandes hornos de carbón vegetal de la época. En 1810, ya era habitual que midieran 14 m de altura (>70 m^3). Después de 1840, Lowthian Bell (1816-1904), un destacado maestro de fragua británico, introdujo una importante mejora de diseño, y a finales del siglo XIX los mayores altos hornos medían casi 25 m y tenían un volumen interno de 300 m^3 (Bell, 1884; Smil, 2016). Estos hornos más grandes, que eran mucho más productivos (>250 t/día para los hornos de coque en 1900 frente a <10 t/día para los mejores hornos de carbón vegetal), permitieron que la producción mundial de arrabio pasara de 800.000 t en 1750 a 30 Mt en 1900, sentaron las bases del desarrollo de la industria siderúrgica moderna (post-1860) y proporcionaron el metal clave de la industrialización (Smil, 2016).

Máquinas de vapor

El motor de vapor fue la primera nueva fuente de energía introducida con éxito desde la adopción de los molinos de viento, más de 800 años antes. Fue el primer convertidor práctico, económico y fiable de la energía química del carbón en energía mecánica y la primera fuente de

energía inanimada que utilizó un combustible fósil y no una transformación casi instantánea de la radiación solar. Los motores de principios del siglo XVI-II solo proporcionaban un movimiento alternativo adecuado para el bombeo, pero antes de 1800 aparecieron diseños que proporcionaban un movimiento rotatorio más práctico (Dickinson, 1939; Jones, 1973). Sin duda, la adopción de la máquina de vapor tuvo una importancia enorme en la industrialización, la urbanización y el transporte mundiales, y, de hecho, ya se ha escrito mucho sobre ello (Von Tunzelmann, 1978; Hunter, 1979; Rosen, 2012).

Con todo, la comercialización y adopción generalizada de los motores de vapor progresaron lentamente —requirieron más de un siglo—, e incluso cuando se difundieron con mayor rapidez, después de 1820, tuvieron que competir, como ya se ha señalado antes, con las ruedas hidráulicas y las turbinas. Y aunque su uso acabó con muchos tipos de trabajo humano y animal (el bombeo de agua en las minas, numerosas tareas de manufactura, etc.), el peso absoluto del trabajo humano y la tracción animal siguió creciendo durante todo el siglo XIX. Todo ello ha conducido a reevaluar el consenso generalizado que en la práctica equipara la adopción de las máquinas de vapor con el proceso generalmente conocido —de manera engañosa— como Revolución Industrial.

La percepción dominante según la cual durante esa época se dieron cambios económicos y sociales revolucionarios (Ashton, 1948; Landes, 1969; Mokyr, 2009) ha sido cuestionada por quienes la consideran un fenómeno mucho más restringido, incluso localizado, con cambios técnicos que afectaron solo a determinadas industrias (algodón, fabricación de hierro, transporte) y dejaron otros sectores en una situación de estancamiento premoderno hasta mediados del siglo XIX (Crafts and Harley, 1992). Algunos críticos han ido más allá, argumentando que el cambio macroeconómico fue tan pequeño que la expresión Revolución Industrial dejaría de tener sentido (Cameron,

1982) —y que la idea misma de que existiera una revolución industrial en Reino Unido es un mito (Fores, 1981)—.

Concretamente, los datos demuestran que el crecimiento económico británico durante el siglo XIX no puede vincularse directamente con el vapor (Crafts and Mills, 2004). A pesar de la existencia de máquinas de vapor, «la economía británica era principalmente tradicional 90 años después de 1760» (Sullivan, 1990: 360), y «el trabajador británico típico de mitad del siglo XIX no era un maquinista en una fábrica, sino un artesano u obrero tradicional o un empleado doméstico» (Musson 1978, 141). Pero el juicio es más justo cuando se considera el proceso en términos de consumo global de energía: su enorme incremento —los totales anuales de Wrigley (2010) para Inglaterra y Gales son de 117 PJ en 1650-1659, 231 PJ un siglo más tarde y 1,83 EJ en 1850-1859, esto es, una multiplicación por 15 en 200 años— hizo posible a su vez un crecimiento económico exponencial; indudablemente, la máquina de vapor fue el catalizador mecánico clave de la industrialización y la urbanización.

Pero su pleno impacto no llegó hasta después de 1840 con la rápida construcción de ferrocarriles y barcos de vapor e instalaciones para la producción centralizada de energía cinética (transmitida por correas a máquinas individuales) en empresas manufactureras. Su historia práctica comenzó cuando Denis Papin (1647-1712) construyó un modelo pequeño, experimental, en 1690. Poco después, Thomas Savery (1650-1715) inventó una pequeña bomba de vapor de 750 W (1 caballo de fuerza) que funcionaba sin pistón. En 1712 Newcomen (1664-1729) ya había construido un motor de 3,75 kW para accionar las bombas hidráulicas de las minas (Rolt, 1963). Como este motor trabajaba a presión atmosférica y condensaba el vapor en la parte inferior del pistón, su eficiencia era muy baja, como máximo del 0,7% (figura 5.2). Hacia 1770, John Smeaton, del que hemos hablado en el capítulo 4, ya había mejorado el diseño y duplicado dicha eficiencia.

Las máquinas de Newcomen comenzaron a generalizarse en las minas inglesas después de 1750, pero, como su bajo rendimiento solo

era compatible con el acceso al combustible *in situ*, resultaban inútiles en los lugares donde el combustible debía ser transportado. James Watt (1736-1819) dejó clara la intención de su famoso diseño en el propio título de la patente que presentó en 1769: *Un nuevo método inventado para reducir el consumo de vapor y combustible* (Watt, 1855 [1769]). La patente en cuestión fue concedida el 25 de abril de 1769, y el listado sistemático de mejoras de Watt deja claro cómo la nueva máquina se diferenciaba de sus predecesoras (recuadro 5.3).

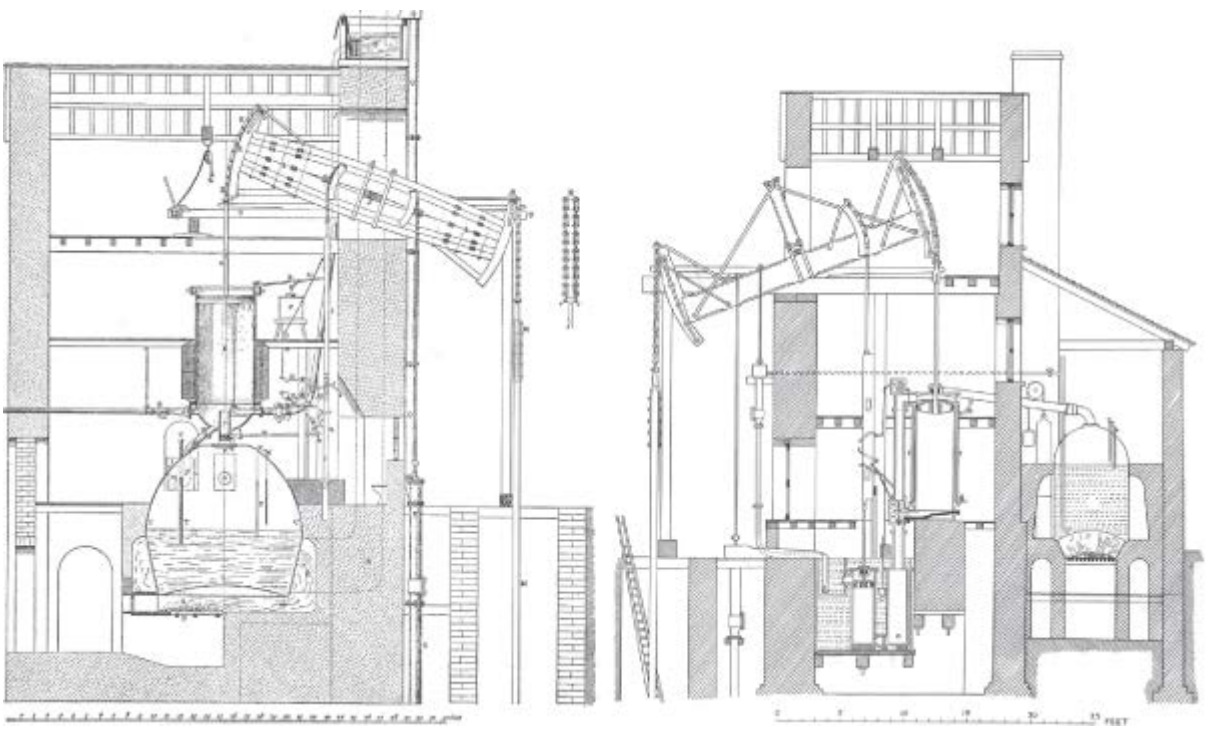


Figura 5.2 Máquinas de vapor de Newcomen y Watt. a. En la máquina de Newcomen, construida por John Smeaton en 1772, la caldera se colocaba debajo del cilindro y el vapor se condensaba dentro del cilindro inyectando agua de la tubería que conducía a su parte inferior derecha. b. En el motor de Watt, construido en 1788, la caldera se colocaba en un recinto separado, el cilindro se envolvía en una camisa aislante y un condensador separado se conectaba a una bomba de aire que mantenía el vacío. Fuente: Farey (1827).

RECUADRO 5.3

La patente de 1769 de Watt

Así es como Watt presentó su diseño mejorado:

> Mi método para reducir el consumo de vapor, y, por tanto, de combustible, en los motores de combustión consiste en los siguientes principios: primero, el recipiente en el que la fuerza del vapor debe ser empleada para accionar la máquina, que llamamos cilindro en los motores de combustión comunes y que yo llamo recipiente de vapor, debe en todo momento, mientras la máquina esté en funcionamiento, mantenerse tan caliente como el vapor que entra en él. [...]
>
> Segundo, en los motores que trabajan total o parcialmente por condensación de vapor, el vapor debe ser condensado en recipientes distintos de los de vapor (o cilindros), aunque ocasionalmente comunique con ellos. A estos recintos los llamo condensadores, y mientras las máquinas están funcionando, estos condensadores deben mantenerse al menos tan fríos como el aire en las cercanías de las máquinas mediante aplicación de agua u otros cuerpos fríos.
>
> Tercero, cualquier aire o vapor elástico que no sea condensado por el frío del condensador y que pueda impedir el funcionamiento de la máquina debe ser extraído de los recipientes de vapor o los condensadores por medio de bombas forjadas por los propios motores, o de otra manera. (Watt, 1855 [1769], 2)

La innovación más importante fue claramente la introducción de un condensador separado (figura 5.2). Más tarde Watt también introdujo un cilindro de doble efecto (en el que el vapor movía el pistón tanto en la carrera ascendente como en la descendente) y un regulador centrífugo que mantenía velocidades constantes con cargas variables. De acuerdo con un modelo profundamente moderno, Watt y su socio financiero, Matthew Boulton (1728-1809), no cobraban al entregar un motor, sino de acuerdo con la mejora de rendimiento que dicho motor generaba respecto a la máquina de Newcomen. La minería de carbón y las máquinas de vapor reforzaron su desarrollo mutuo. La necesidad de bombear más agua de minas más profundas fue una de las claves del desarrollo de las máquinas de vapor. La disponibilidad de combustible más barato condujo a su proliferación

y, por tanto, a una mayor expansión de la minería. Pronto los motores también impulsaron la maquinaria de bobinado y ventilación.

El motor de vapor mejorado de Watt fue un éxito comercial casi instantáneo y, más allá de la minería, tuvo un impacto en la industria y el transporte (Thurston, 1878; Dalby, 1920; Von Tunzelmann, 1978). Al mismo tiempo, este éxito debe ser situado en el contexto industrial de finales del siglo XVIII: la cantidad de motores mejorados que se pusieron en funcionamiento es realmente ridícula comparada con lo que hoy denominamos producción en masa. Cuando la patente original expiró en 1800, 25 años después de la Ley de Máquinas de Vapor de 1775, la empresa propiedad de Watt y Boulton había fabricado unos 500 motores (un 40% de los cuales para el bombeo de agua en minas). La capacidad media de los motores era de 20 kW, más de cinco veces superior a la media de los molinos hidráulicos de la época y casi tres veces superior a la de los molinos de viento.

Los motores más grandes que Watt y Boulton fabricaron (más de 100 kW) competían con las ruedas hidráulicas más potentes del mundo. Pero la ubicación de las ruedas hidráulicas era inflexible, mientras que las máquinas de vapor podían ubicarse con mucha libertad, especialmente cerca de un puerto o a lo largo de un canal, donde el transporte barato en barcos o botes permitía llevar el combustible necesario. Aunque los inventos de Watt marcaron el comienzo del éxito industrial de la máquina de vapor, en realidad su patente frenó la innovación. ¿Era Watt reacio a usar vapor de alta presión por motivos de seguridad o trataba de impedir que surgiera una patente similar mientras durara la suya? Watt y Boulton no solo nunca intentaron desarrollar un medio de transporte impulsado por vapor, sino que disuadieron a William Murdock (1754-1839), el principal constructor de sus motores, de hacerlo, y cuando Murdock insistió, Boulton le persuadió para que no presentara una patente (recuadro 5.4).

RECUADRO 5.4

Watt y Boulton retrasan el desarrollo del carro de vapor

En 1777, cuando tenía 23 años, William Murdock recorrió 500 km a pie hasta Birmingham para trabajar en la empresa de James Watt. Muy pronto tanto Watt como su socio, Matthew Boulton, se dieron cuenta de que era un gran activo, capaz de construir nuevas máquinas de manera eficiente y rentable. En 1784 Murdock fabricó un carro de vapor en miniatura: un vehículo de tres ruedas con una caldera situada entre las dos ruedas traseras. Tras fabricar un segundo modelo, finalmente Murdock decidió patentar su carro de vapor (Griffiths, 1992).

Pero cuando estaba de camino hacia Londres, en Exeter, fue interceptado por Boulton, que lo convenció de que volviera a casa sin registrar la patente: pensaba que la persistencia de Murdock era un trastorno. Como Boulton escribió a Watt:

> Dijo que iba a Londres a buscar hombres, pero pronto descubrí que llevaba su Steam Carg [su carro de vapor] y que quería mostrarlo y sacar una patente. [...] Sin embargo, logré convencerle de que volviera a Cornwall en la siguiente diligencia y en efecto llegó aquí al mediodía del día siguiente. Creo que es una suerte que nos cruzáramos. Estoy seguro de que puedo resolver el trastorno o hacer de la necesidad virtud. Al menos he logrado evitar la travesura que hubiera resultado de su viaje a Londres (Griffiths, 1992: 161).

Tal vez este episodio no marcara ninguna diferencia en el futuro desarrollo del transporte de vapor, porque incluso el mejor carro imaginable construido en 1800 habría sido demasiado pesado, problema especialmente complicado debido a la práctica ausencia de carreteras bien pavimentadas capaces de soportar el tráfico pesado. La única forma práctica de hacer funcionar un vehículo de vapor era ponerlo sobre raíles, e incluso para eso tuvieron que pasar décadas para concebir la idea y comercializarla, después de que la expiración de la patente de Watt en 1800 condujera a un intenso periodo de innovación. El primer avance esencial fue la creación de calderas de

alta presión por Richard Trevithick (1771-1833) en Inglaterra en 1804 y Oliver Evans (1755-1819) en 1805 en Estados Unidos. Otros hitos fueron el diseño del primer motor de flujo unidireccional, introducido por Jacob Perkins (1766-1849) en 1827, la invención de un engranaje de válvula reguladora en 1849 por George Henry Corliss (1817-1888) y las mejoras francesas de los motores de locomotoras compuestas en la segunda mitad de la década de 1870. Se desarrollaron una veintena de tipos de motores básicos que dieron lugar a una gran variedad de diseños especializados (Watkins, 1967).

Los primeros usos de los motores de vapor para el bombeo y el bobinado en las minas (figura 5.3) pronto dieron paso a una gran variedad de aplicaciones estacionarias y móviles. Los usos más notables fueron —de lejos— las transmisiones por correa en innumerables fábricas y durante la revolución del transporte del siglo XIX por tierra y agua. El desarrollo de los barcos y las locomotoras de vapor se produjo simultáneamente. Los primeros barcos de vapor se construyeron durante la década de 1780 en Francia, Estados Unidos y Escocia, aunque los primeros barcos con verdadero éxito comercial fueron el Charlotte Dundas de Patrick Miller en 1802, en Inglaterra, y el Clermont de Robert Fulton en 1807, en Estados Unidos.

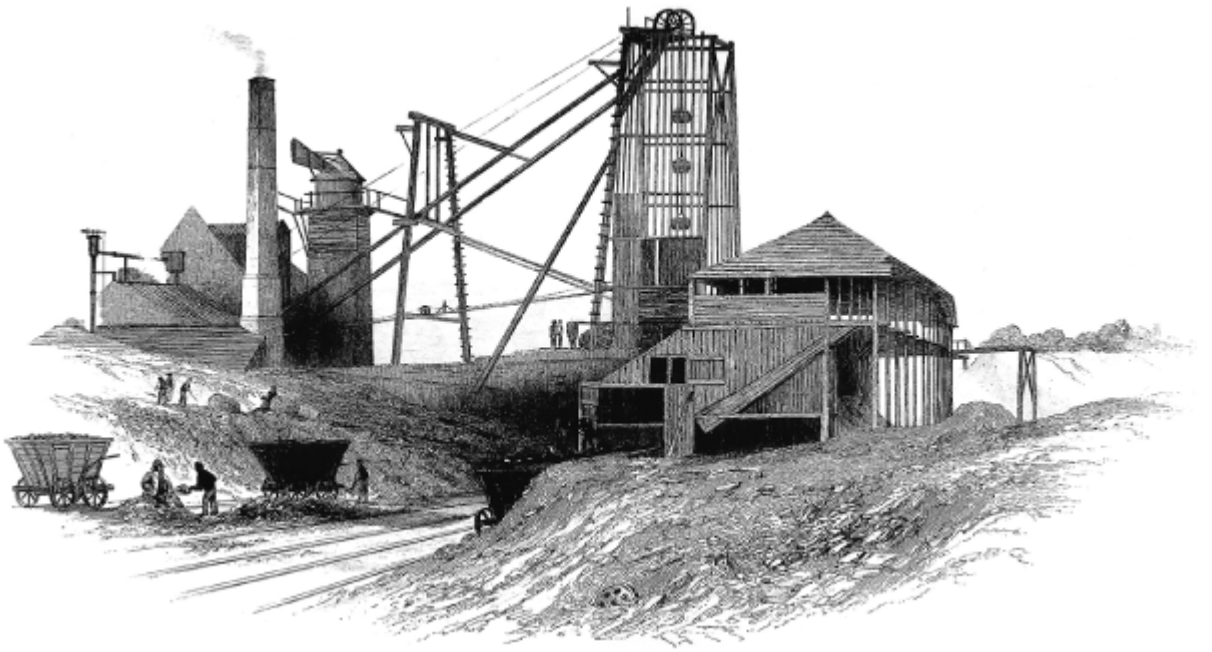


Figura 5.3 El pozo C de Hebburn Colliery era una típica mina de carbón inglesa en los inicios de la máquina de vapor. La máquina de vapor de la mina estaba alojada en el edificio que tiene una chimenea y accionaba la maquinaria de bobinado y ventilación. Fuente: Hair (1844).

Los primeros barcos de vapor —tanto fluviales como marítimos— fueron propulsados por ruedas de paletas situadas en la popa o el centro del barco. La primera travesía del Atlántico (Quebec-Londres) la realizó el Royal William en 1833 (Fry, 1896). La primera travesía hacia el oeste fue la carrera entre el Sirius y el Great Western en 1838, año en que John Ericsson desarrolló con éxito la primera hélice de propulsión. Gradualmente, barcos de vapor más grandes y más rápidos sustituyeron a los barcos de vela en los viajes con más pasajeros y más carga en el Atlántico norte, y más adelante en los viajes de larga distancia hacia Asia y Australia. Estos barcos transportaron la mayoría de los 60 millones de emigrantes que abandonaron el continente europeo entre 1815 y 1930 en dirección, sobre todo, de América del Norte (Baines, 1991). Al mismo tiempo, los barcos de navegación transcontinental de carbón se convirtieron en importantes instrumentos de la política exterior estadounidense (Shulman, 2015).

La adopción del transporte de vapor en tierra también fue lenta al principio y muy rápida después gracias a la rápida difusión de los ferrocarriles. En 1804 Richard Trevithick realizó un experimento con una máquina sobre rieles de hierro fundido al que siguieron varios pequeños ferrocarriles privados. El primer ferrocarril público —un Liverpool-Manchester— fue inaugurado en 1830 y utilizó la locomotora Rocket de George Stephenson (1781-1848). La profusión de nuevos diseños condujo a la mejora de la eficiencia y la velocidad. Hacia 1900, los mejores motores de locomotoras funcionaban a presiones hasta cinco veces superiores a las de la década de 1830 y con eficiencias superiores al 12% (Dalby, 1920). Con el tiempo se hizo común superar los 100 km/h y durante la década de 1930 las locomotoras más aerodinámicas se acercaron a —e incluso superaron — los 200 km/h (figura 5.4).

Desde los 56 km del primer enlace interurbano entre Liverpool y Manchester, en 1830, los ferrocarriles británicos alcanzaron 30.000 km —y los europeos casi 250.000 km— en 1900. En el resto del mundo el grueso de la expansión ferroviaria tuvo lugar durante las tres últimas décadas del siglo XIX: en 1900 la red rusa había alcanzado 53.000 km (aunque el ferrocarril Transiberiano hacia el Pacífico no se terminó hasta 1917), el sistema estadounidense más de 190.000 km (incluidas tres rutas transcontinentales) y el total mundial (que también incluía muchos kilómetros en la India británica) alcanzaba 775.000 km (Williams, 2006). Por tanto, la expansión del ferrocarril causó un crecimiento sin precedentes de la demanda de acero durante la segunda mitad del siglo XIX.

Por supuesto, otros nuevos mercados industriales también consumieron cada vez más metal: la propia industria siderúrgica (para desarrollar su capacidad de fabricación de hierro y acero), la nueva industria eléctrica (para calderas, turbogeneradores de vapor, transformadores y cables eléctricos), la extracción y el transporte de petróleo y gas (para tuberías, brocas y encamisados de perforación, oleoductos y tanques de almacenamiento), el transporte marítimo

(para nuevos barcos con casco de acero), manufacturas varias (para máquinas, herramientas y componentes) y las industrias tradicionales textil y de elaboración de alimentos. Pero los rieles (anteriormente fabricados con hierro forjado) fueron el producto acabado más importante fabricado con el acero Bessemer barato (para más información, véase el capítulo 6) introducido a finales de la década de 1860, y siguieron siéndolo hasta el final del siglo (Smil, 2016).

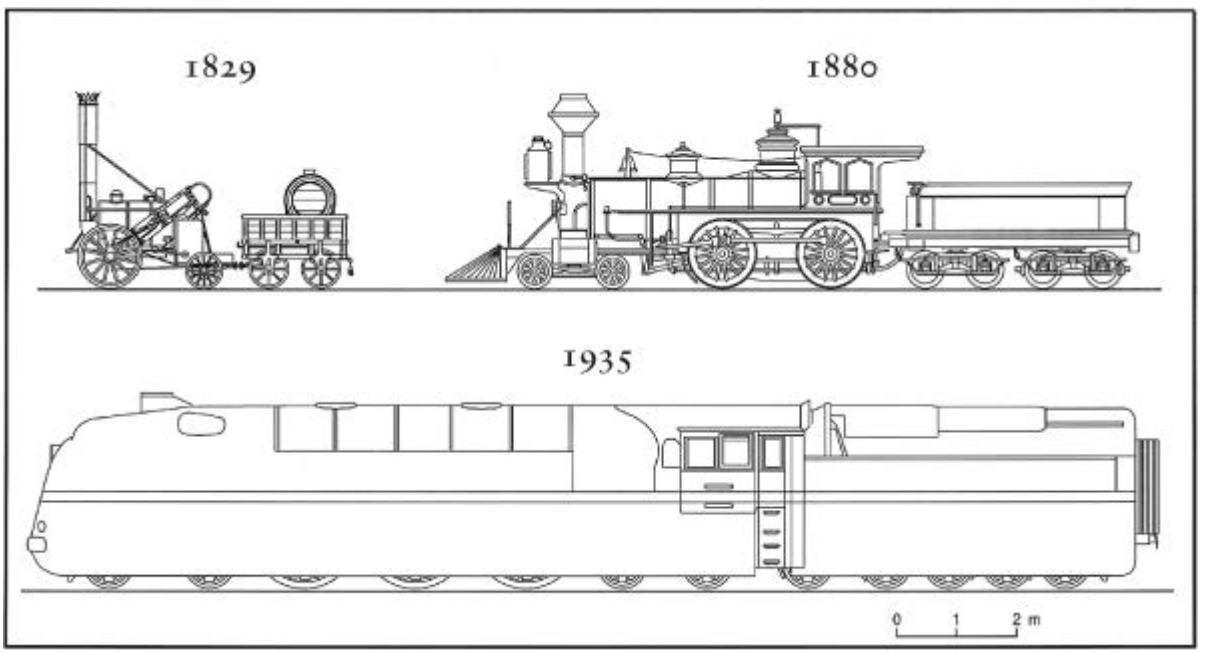


Figura 5.4 Algunas locomotoras de vapor especialmente importantes. La locomotora Rocket de 1829, de Stephenson, fue la primera locomotora comercial e introdujo dos características clave de todo diseño posterior: cilindros separados a cada lado que movían las ruedas por medio de bielas cortas, y una eficiente caldera multitubular. En Estados Unidos, los diseños estándar nacionales dominaron la industria del ferrocarril desde mediados de 1850. El aerodinámico diseño alemán Borsig alcanzó 191,7 km/h en 1935. Fuente: Byrn (1900) y Ellis (1983).

El apogeo de la máquina de vapor se produjo más de un siglo después de la patente mejorada de Watt: a principios de la década de 1880 su adopción generalizada había sentado los cimientos energéticos de la industrialización moderna: la disponibilidad de tanta potencia concretada a un precio asequible transformó tanto la productividad manufacturera como el transporte terrestre y marítimo

de larga distancia. A su vez, estos cambios provocaron una extensa urbanización, el aumento todavía incipiente de la prosperidad, el crecimiento del comercio internacional y cambios importantes en el equilibrio del poder a nivel internacional. El progreso técnico acumulado fue realmente notable: las máquinas de vapor más grandes diseñadas durante la década de 1890 eran 30 veces más potentes que las de 1800 (3 MW frente a 100 kW), mientras que la eficiencia de las mejores unidades era diez veces mayor (un 25 % frente a un 2,5 %) (figura 5.5). Este enorme crecimiento del rendimiento, que se tradujo en un gran ahorro de combustible y una menor contaminación atmosférica, se debió principalmente a que las presiones de funcionamiento se multiplicaron por cien, pasando de 14 kPa a 1,4 MPa.

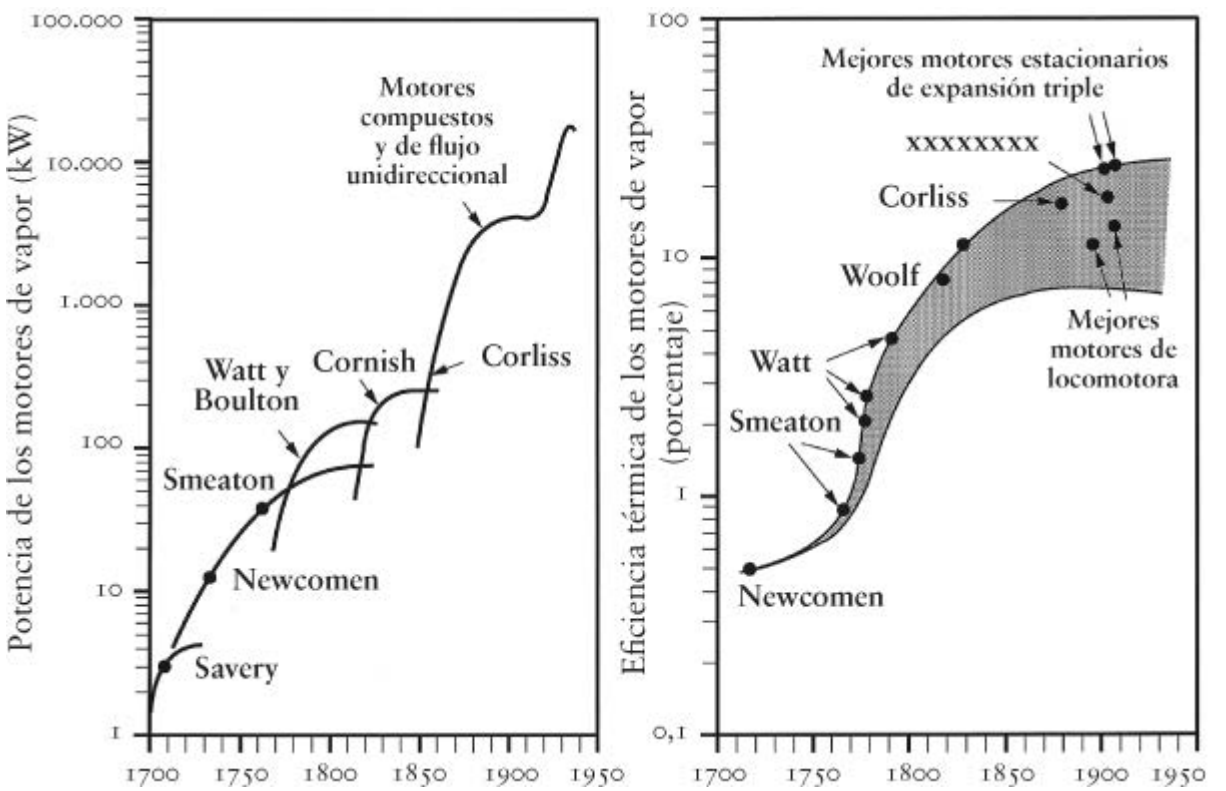


Figura 5.5 Aumento de la potencia y mejora de la eficiencia de las mejores máquinas de vapor, 1700-1930. Fuentes: Dickinson (1939) y Von Tunzelmann (1978).

Estos avances —combinados con su carácter idóneo para infinidad de usos industriales, constructivos y de transporte debido a su robustez y longevidad— convirtieron la máquina de vapor en el principal motor inanimado de la industrialización del siglo XIX. Sus usos estacionarios incluían desde tareas que antes realizaban los motores animados, las ruedas hidráulicas o los molinos de viento (como el bombeo de agua, el aserrado de madera o el molido de granos), hasta tareas industriales emergentes (como el impulso de las transmisiones por correa para hacer funcionar maquinaria de perforación, giro o pulido, comprimiendo el aire), y algunas de las mayores máquinas de vapor jamás construidas se utilizaron para hacer girar las dinamos de las primeras centrales eléctricas durante los años 1880 y 1890 (Smil, 2005).

Los usos móviles de la máquina de vapor revolucionaron el transporte terrestre y marítimo con la rápida expansión del ferrocarril y la construcción de nuevos barcos de vapor. Otras aplicaciones móviles que facilitaron tareas pesadas importantes fueron las grúas de vapor, los martinetes y las excavadoras (la primera pala de vapor fue patentada en 1839). El canal de Panamá no podría haberse construido tan rápido (1904-1914) sin el despliegue de unas cien grandes palas de vapor de la marca Bucyrus y Marion (Mills, 1913; Brodhead, 2012), e incluso en los campos americanos se construyeron arados de vapor.

Pero las máquinas de vapor fueron víctimas de su propio éxito: a medida que su eficiencia típica y su capacidad máxima alcanzaban niveles sin precedentes (órdenes de magnitud por encima de cualquier motor tradicional), toparon con sus limitaciones inherentes y se empezó a exigírseles más de lo que podían ofrecer (Smil, 2005). Incluso después de más de un siglo de mejoras constantes, las máquinas de vapor más utilizadas seguían siendo muy ineficientes: en 1900 una locomotora de vapor típica desperdiciaba el 92% del carbón que se introducía en su caldera. Además, su gran peso limitaba sus usos móviles lejos del agua y los rieles, que facilitaban soportar su masa (recuadro 5.5)

RECUADRO 5.5

Relación peso/potencia de las locomotoras de vapor y un megaterio

Un caballo medio-pesado de 750 kg y un caballo de fuerza (745 W) tienen una relación masa/potencia (o carga de potencia) de casi exactamente 1.000 g/W —igual que un hombre de 80 kg trabajando a una velocidad constante de 80 W—. Las primeras máquinas de vapor del siglo XVIII eran muy masivas y tenían cargas de potencia casi tan elevadas como las personas y los animales de tiro (600-700 g/W). En 1800 la proporción había disminuido a 500 g/W. En 1900 las mejores locomotoras de vapor solo pesaban 60 g/W. A pesar de esta progresión más que notable, esta carga de potencia todavía era demasiado elevada para dos aplicaciones muy diferentes pero fundamentales: el impulso de vehículos terrestres y la rotación de grandes dinamos en nuevas plantas de generación de electricidad.

En 1894 el nuevo motor de gasolina de Daimler-Maybach del coche que ganó la carrera París-Burdeos tenía una carga de potencia de menos de 30 g/W (Beaumont, 1902), descartando *de facto* el uso de máquinas de vapor para el transporte por carretera. E incluso el primer diseño comercial de las pequeñas turbinas de vapor de Charles Parsons —una unidad de 100 kW construida en 1891— tenía una carga de potencia de solo 40 g/W. Antes del comienzo de la Primera Guerra Mundial la proporción había caído por debajo de 10 g/W y la eficiencia había superado el 25%, muy por encima del 11-17% de los mejores motores de vapor (Smil, 2005). Por tanto, las 16 máquinas de vapor Westinghouse-Corliss instaladas en la central eléctrica de Edison de Nueva York en 1902 ya estaban obsoletas. Aun así, tres años más tarde la estación de Greenwich del Council Tramway de Londres instaló «un megaterio del mundo de los motores» (Dickinson, 1939: 152), el primer motor de vapor compuesto, de 3,5 MW, en un espacio parecido a una catedral. Las enormes máquinas de Greenwich eran casi tan altas (14,5 m) como anchas, mientras que un generador de Parsons con esa misma potencia solo medía 3,35 m de ancho y 4,45 m de alto.

Paradójicamente, las máquinas de vapor no lograron ser más predominantes cuando alcanzaron su máxima eficiencia y potencia y su mejor relación peso/potencia. A pesar de las impresionantes mejoras que tuvieron lugar y de su presencia en la industria, el

ferrocarril y el transporte marítimo, el principal motor del siglo XIX no logró ser el motor líder del siglo XX. Ese papel se lo repartieron las turbinas de vapor, que supieron satisfacer la demanda de motores más potentes para la generación de electricidad, y los motores de combustión interna —primero los de gasolina y, a partir de la década de 1980, los de diésel—, que fueron los primeros motores suficientemente ligeros, potentes y asequibles para el transporte por carretera. La difusión de los motores de combustión interna fue posible gracias a la disponibilidad de combustibles líquidos baratos refinados a partir del petróleo: tenían mayor densidad energética que el carbón, eran más fáciles de transportar y almacenar, y quemarlos era más limpio, una combinación que aún hoy hace que sean la mejor opción de combustible para el transporte.

Petróleo y motores de combustión interna

El inicio de la extracción y el consumo de petróleo a gran escala tuvo lugar durante unas pocas décadas a finales del siglo XIX. Por supuesto, los hidrocarburos (petróleos y gases naturales) se conocen desde hace miles de años debido a las filtraciones naturales, las piscinas de bitumen (*bitumen pools*) y los «pilares ardientes», especialmente comunes en Oriente Medio (en particular en el norte del Iraq), pero que también se encuentran en otros lugares. La lista de propiedades adjunta al testamento de George Washington describe una fuente ardiente en el valle del río Kanawha, en Virginia Occidental:

> El terreno, del cual los 125 acres son una porción, fue ocupado por el general Andrew Lewis y por mí porque contiene un manantial bituminoso de naturaleza tan inflamable que quema con tanta libertad como los espíritus, y resulta casi igual de difícil de extinguir. (Upham, 1851: 385)

Pero antiguamente el uso de hidrocarburos se limitaba casi exclusivamente a materiales de construcción o revestimiento. Su uso

como combustible, incluyendo el calentamiento de las termas de Constantinopla durante el Imperio romano tardío, fue una rareza (Forbes, 1964). Una notable excepción fue la quema de gas natural para evaporar salmueras en la provincia china de Sichuan, que carece de litoral (Adshead, 1992), al menos desde el comienzo de la dinastía Han (200 a. C.). El proceso fue posible gracias a la invención, también en China, de la perforación por percusión (Needham, 1964): 2-6 hombres saltaban sobre una palanca y hacían que pesadas brocas de hierro, unidas a torres de perforación debambú por medio de largos cables, se elevaran rítmicamente. Las perforaciones más profundas registradas son de solo 10 m durante la dinastía Han, alcanzan los 150 m en el siglo X y culminan en el pozo Xinhai, de 1 km de profundidad, en 1835 (Vogel, 1993). El gas natural, distribuido por tuberías de bambú, se utilizaba para evaporar las salmueras en enormes cacerolas de hierro fundido.

Con todo, esta práctica permaneció aislada y el comienzo de la era mundial de los hidrocarburos se demoró dos mil años más. En América del Norte el petróleo se recogía de filtraciones naturales en el oeste de Pensilvania a finales del siglo XVIII y se vendía como «aceite de Séneca» medicinal, y en Francia las arenas de alquitrán se explotaban desde 1745 en Alsacia, cerca de Merkwiller-Pechelbronn, donde se construyó la primera pequeña refinería en 1857 (Walther, 2007). Pero solo hay un lugar en el mundo preindustrial con una larga historia de recogida de petróleo: la península de Absheron en Bakú, en el mar Caspio, en el actual Azerbaiyán.

Existen textos medievales que describen las piscinas y los pozos de petróleo de la zona. Una inscripción de 1593 señala un pozo de 35 m de profundidad excavado manualmente en Balakhani (Mir-Babaev, 2004). En 1806, cuando la Rusia zarista tomó el control de la zona, la península de Absheron tenía muchos pozos poco profundos de los que se recogía y destilaba petróleo ligero para producir queroseno para el alumbrado local y la exportación en barriles de madera y camellos (en bolsas de piel). La primera fábrica comercial de destilación de petróleo

del mundo fue construida por los rusos en 1837 en Balakhani. En 1846 excavaron el primer pozo de petróleo exploratorio del mundo (de 21 m de profundidad) en Bibi-Heybat. De este modo comenzó la explotación de uno de los campos petroleros gigantes del mundo, que aún hoy sigue en funcionamiento.

La historia occidental de la industria petrolera suele omitir estos acontecimientos, o los menciona únicamente después de haber descrito los inicios de la industria petrolífera estadounidense en Pensilvania. La búsqueda de petróleo en Estados Unidos estuvo motivada por la necesidad de un sustituto del costoso aceite de ballena que se obtenía en los barcos a partir de la grasa de cachalote y se quemaba en las lámparas (Brantly, 1971). Los estadounidenses tenían la flota ballenera más grande del mundo —más de 700 barcos en 1846—. Durante los primeros años de la década de 1840, esta flota trajo cada año 160.000 barriles de aceite de cachalote a los puertos de Nueva Inglaterra (Starbuck, 1878; Francis, 1990).

Pero el primer pozo norteamericano fue excavado manualmente en Canadá en 1858 por Charles Tripp y James Miller Williams, cerca de Black Creek, en el condado de Lambton, en el suroeste de Ontario, dando lugar al primer boom petrolero del mundo y al cambio de nombre de la aldea a Oil Springs (Bott, 2004). El famoso primer pozo perforado y no excavado, descrito en todas las historias del petróleo, se completó bajo la supervisión de Edwin Drake (1819-1880), un exconductor de trenes contratado por George Henry Bissell (1821-1884) que fundó la Pennsylvania Rock Oil Company (Dickey, 1959). Su emplazamiento era una filtración de petróleo en Oil Creek, cerca de Titusville, en Pensilvania. Los perforadores encontraron petróleo a una profundidad de 21 m el 27 de agosto de 1859, fecha que suele considerarse como el comienzo de la era petrolera moderna. La tarea se llevó a cabo con un taladro de percusión propulsado por una pequeña máquina de vapor.

Durante la década de 1860, tres países —Estados Unidos, Canadá y Rusia— desarrollaron nuevas y florecientes industrias petroleras. La

producción canadiense aumentó durante un tiempo con el primer pozo de petróleo del mundo en Oil Springs, en 1862, y con nuevos descubrimientos en la cercana Petrolea, en 1865, pero mucho antes de que terminara el siglo se volvió negligible. Canadá solo volvió a unirse al grupo de los principales productores de petróleo del mundo después de la Segunda Guerra Mundial, gracias al descubrimiento de gigantescos campos petroleros en Alberta. En cambio, la producción estadounidense siguió aumentando, primero con numerosos pequeños campos en la cuenca de los Apalaches (desde Nueva York hasta Virginia Occidental, pasando por Pensilvania), y luego, a partir de 1865, en California. La extracción en la cuenca de Los Ángeles comenzó en 1880, en la de San Joaquín en 1891 (sus gigantescos campos de Midway-Sunset y del río Kern siguen produciendo más de un siglo después) y en el condado de Santa Bárbara después de 1890 (incluyendo los primeros pozos *offshore* del mundo, perforados desde muelles de madera).

Kansas se unió a los estados productores de petróleo en 1892, Texas en 1894 (campo Corsicana) y Oklahoma en 1897. El 10 de enero de 1901, Anthony Francis Lukas hizo un descubrimiento espectacular: el campo Spindletop, cerca de Beaumont, en el sur de Texas, con un pozo que producía 100.000 barriles/día (Linsley, Rienstra y Stiles, 2002; figura 5.6). La naciente industria petrolera rusa recibió mucha inversión extranjera, en particular de Ludwig y Robert Nobel a través de la Nobel Brothers Petroleum Company, fundada en 1875, y la Caspian and Black Sea Oil Industry and Trade Society, de los hermanos Rothschild, creada en 1883. En 1890 Rusia producía más energía a partir de petróleo que de carbón, y en 1899, antes del descubrimiento de petróleo en el sur de Texas, se convirtió brevemente en el mayor productor mundial de petróleo, con algo más de 9 Mt/año (Samedov, 1988), en su mayor parte exportadas por inversores extranjeros. La producción de Bakú comenzó a descender después de 1900 y en 1913 el consumo de carbón en Rusia más que doblaba el de petróleo. Otros importantes descubrimientos

petrolíferos anteriores a 1900 tuvieron lugar en Rumanía, Indonesia (Sumatra en 1883) y Birmania (donde la producción comenzó en 1887). México se unió a las filas de los productores de petróleo en 1901; en 1908 se produjo el primer descubrimiento importante en Oriente Medio, en Masjid-e-Soleiman, en Irán; el petróleo de Trinidad se probó por primera vez en 1913; y el gigantesco campo Mene Grande de Venezuela, en la costa del lago Maracaibo, comenzó a explotarse en 1914.

La mayoría de descubrimientos fueron campos de hidrocarburos que contenían petróleo y gas natural, pero el gas se utilizó muy poco durante las primeras décadas de la industria de los hidrocarburos porque sin compresores y tuberías de acero no podía recorrer largas distancias, de tal manera que simplemente solía escupirse a la atmósfera. En cambio, la elevada densidad energética y la fácil portabilidad de los combustibles líquidos refinados a partir del petróleo (gasolina, queroseno y fueloil) los convirtieron en la fuente de energía predominante en el transporte, y la invención y rápida adopción del motor de combustión interna abrió un nuevo y enorme mercado para su consumo.

Figura 5.6 Petróleo brotando del pozo Spindletop, cerca de Beaumont, en Texas, en enero de 1901 (Corbis).

Aunque la extracción de petróleo produjo una fuente de energía para iluminación más asequible, la comercialización de la electricidad y las bombillas (véase sección siguiente) necesitaron menos de 25 años desde su aparición en Estados Unidos para constituir una mejor alternativa. Cuando la extracción de petróleo comenzó su expansión, en la década de 1860, tampoco existían motores comerciales de combustión interna capaces de alimentar vehículos. Sin embargo, nuevamente hicieron falta solamente 25 años para que dos ingenieros alemanes construyeran los primeros motores automóviles prácticos, generando una demanda de combustible que más de 130 años después todavía no ha alcanzado su máximo nivel mundial.

La expansión del motor de combustión interna —una nueva fuente de energía cuyo funcionamiento consiste en quemar combustible dentro de un cilindro— fue muy rápida. Los diseños comerciales que

surgieron en los primeros años, entre 1886 y 1905, permanecieron fundamentalmente inalterados (aunque fueron muy mejorados) durante la mayor parte del siglo XX (Smil, 2005). Tras varias décadas de experimentos fallidos y diseños abandonados, el primer motor de combustión interna con éxito comercial fue patentado en 1860 por Jean Joseph Étienne Lenoir (1822-1900). Sin embargo, el motor de Lenoir no servía para ningún uso móvil: era un cilindro horizontal de doble efecto (*horizontal double-acting machine*) que quemaba una mezcla no comprimida de gas ciudad y aire, encendido con una chispa eléctrica, y su eficiencia era de solo el 4% (Smil, 2005).

Alphonse Eugène Beau (Beau de Rochas, 1815-1893) conceptualizó el funcionamiento del motor de cuatro tiempos en 1862, pero pasaron 15 años antes de que en 1877 Nicolaus August Otto (1832-1891) patentara dicha máquina y posteriormente vendiera 50.000 unidades (de 6 kW de media y con una relación de compresión de solo 2,6) a pequeños talleres que no podían permitirse comprar una máquina de vapor (Clerk, 1909). Este motor, que era muy lento y también consumía gas ciudad, nunca sirvió como fuente de energía para el transporte. Tal motor fue diseñado por Gottlieb Daimler (1834-1900), un antiguo empleado de la compañía de Otto, y Wilhelm Maybach (1846-1929) para quemar gasolina en el taller que tenían en Stuttgart (Walz y Niemann, 1997). La gasolina tiene una densidad energética de 33 MJ/l (1.600 veces la del gas ciudad utilizado por Otto) y un punto de inflamación muy bajo (-40 °C), lo que facilita el arranque de los motores.

Daimler y Maybach construyeron el primer prototipo en 1883. En noviembre de 1885 utilizaron una nueva versión refrigerada por aire para propulsar la primera motocicleta del mundo, y en marzo de 1886 su diseño más grande (0,462 l, 820 W), refrigerado por agua a 600 rpm, se montó en un autocar con ruedas de madera (Walz y Niemann, 1997). Trabajando en paralelo en Mannheim, a 120 km al norte de Stuttgart, Karl Friedrich Benz (1844-1929) diseñó su primer motor de gasolina de dos tiempos en 1883 y, tras la expiración de la patente de

Otto, un nuevo motor de cuatro tiempos, que se apresuró a patentar a su vez en enero de 1886. Montó su motor (de 500 W y 250 rpm) en un chasis de tres ruedas y presentó el vehículo al público el 3 de julio de 1886. El motor de altas revoluciones de Daimler, el encendido eléctrico de Benz y el carburador de flotación de Wilhelm Maybach suministraron los componentes clave de los vehículos de carretera modernos. A principios del siglo XX, el fabricante de automóviles líder en Alemania diseñó el primer coche esencialmente moderno (recuadro 5.6, figura 5.7).

Aunque DMG encarnara la noción de coche de calidad, a principios del siglo XX su posicionamiento en el segmento del lujo era totalmente normal. Dos décadas después de su aparición en Alemania a mediados de la década de 1880, el automóvil de pasajeros seguía siendo una máquina muy cara, fabricada en series pequeñas con métodos de producción artesanales. Y los automóviles estadounidenses no tenían nada especial: un destacado experto británico escribió en 1906 que «el progreso en el diseño y la fabricación de vehículos de motor en Estados Unidos no se ha distinguido por incluir ningún avance notable, ni en este país ni en el continente americano» (Beaumont, 1906: 268). Por supuesto, todo esto cambió dos años más tarde, cuando Henry Ford (1863-1947) introdujo el Modelo T, producido en serie, asequible y pensado para cumplir con los rigores de la conducción en Estados Unidos. Sus logros y su legado se explican en el siguiente capítulo.

RECUADRO 5.6

El primer coche moderno

Aunque el automóvil es un invento alemán, el ingeniero francés Emile Levassor (1844-1897) diseñó el primer vehículo que no fue un mero carruaje sin caballos —eso sí, lo equipó con el mejor motor alemán disponible—. Levassor descubrió el motor en V fabricado por Daimler Motoren Gesellschaft (DMG) en 1891 y diseñó un nuevo chasis para acomodarlo. Durante la década de

1890, los coches equipados con motores DMG ganaron todas las carreras de coches que se hicieron en Europa, pero el coche de la compañía que hizo historia de verdad tuvo un origen puramente comercial (Robson, 1983; Adler, 2006). Emil Jellinek (1853-1918), hombre de negocios y cónsul general del Imperio austrohúngaro en Mónaco, estableció un concesionario de automóviles Daimler el 2 de abril de 1900 y encargó 36 vehículos. Poco después duplicó el pedido. A cambio de este lucrativo pedido, exigió el derecho de venta en exclusiva en Austria-Hungría, Francia, Bélgica y Estados Unidos, así como que los coches llevaran la marca Mercedes, el nombre de su hija.

Para este pedido único, Maybach diseñó un coche que la empresa que lo sucedió, Mercedes-Benz, describió como el primer verdadero automóvil. De hecho, es considerado como «el primer coche esencialmente moderno» (Flink, 1988: 33). El Mercedes 35 fue concebido como un coche de carreras con un perfil alargado; tenía un centro de gravedad muy bajo y un peso total de 1.200 kg. El coche tenía un motor de cuatro cilindros excepcionalmente potente para su época (5,9 l, 26 kW o 35 CV, 950 rpm) con dos carburadores y válvulas de entrada de accionamiento mecánico. Maybach redujo el peso del motor a solo 230 kg utilizando un bloque de aluminio y reduciendo su relación masa/potencia a menos de 9 g/W, un 70% menos que en el mejor motor DMG fabricado en 1895. Pronto el coche estableció un nuevo récord mundial de velocidad (64,4 km/h). En 1903 le siguió el Mercedes 60, aún más potente y con una carrocería más elegante. Fue el comienzo de una historia que 125 años después no ha perdido ningún atractivo.

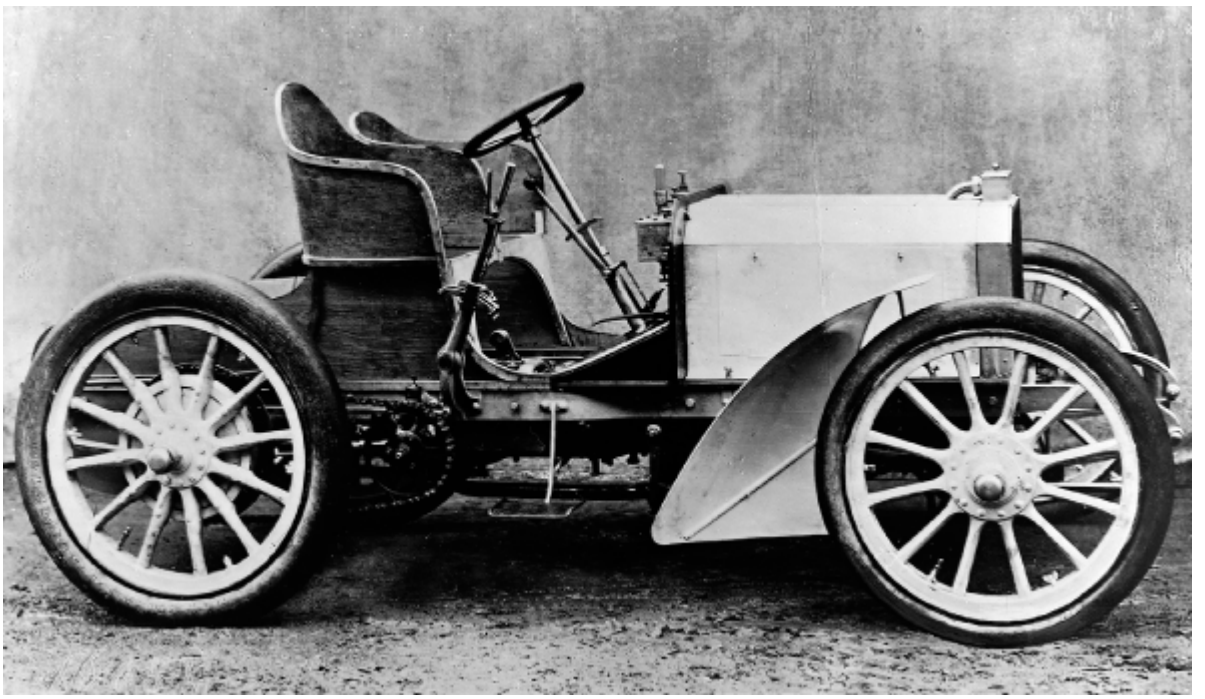


Figura 5.7 El Mercedes 35, diseñado por Wilhelm Maybach y Paul Daimler en 1901. Fotografía de la página web de Daimler.

Dos pioneros improbables —Wilbur (1867-1912) y Orville (1871-1948) Wright, fabricantes de bicicletas en Dayton, Ohio— fueron los primeros en realizar con éxito el primer vuelo con un motor de combustión interna ligero al elevarse brevemente su avión sobre las dunas del pueblo de Kitty Hawk, en Carolina del Norte, el 17 de diciembre de 1903 (McCullough, 2015). No fueron los primeros en intentarlo. Solo 9 días antes, Charles M. Manly hizo un segundo intento de lanzar el Aeródromo A con una catapulta desde una barcaza en Potomac Maine. El avión fue construido con una subvención del gobierno de Estados Unidos recibida por Samuel Pierpoint Langley (1834-1906), secretario del Instituto Smithsonian, y estaba equipado con un potente motor radial de cinco cilindros (39 kW, 950 rpm). Pero, como ocurrió durante el primer intento de Manly, el 7 de octubre de 1903, el avión se sumergió inmediatamente en el agua.

¿Por qué los Wright tuvieron éxito solo menos de cinco años después de que, sin ningún conocimiento previo, escribieran al

Smithsonian para pedir información sobre cómo volar? Como los fabricantes de motores se negaron a construir una máquina que siguiera sus especificaciones, la diseñaron ellos mismos. Su mecánico, Charles Taylor, solo tardó seis semanas en construirla. El motor en cuestión tenía un cuerpo de aluminio y no tenía ni carburador ni bujías, pero sus cuatro cilindros de acero desplazaban 3,29 l y proporcionaban 6 kW de potencia (Gunston, 1986). El motor definitivo, de 91 kg, alcanzó hasta 12 kW en vuelo, para una relación masa/potencia de 7,6 g/W. Pero este motor, ligero y potente, fue solo una de las claves del éxito de los Wright. Ambos hermanos estudiaron aerodinámica y comprendieron la importancia del equilibrio, la estabilidad y el control en el vuelo, y resolvieron este desafío en su planeador de 1902 (Jakab, 1990). Combinaron su experiencia en ingeniería con pruebas rigurosas y sistemáticas de perfiles y formas de ala y vuelos de planeador experimentales. Sus primeros vuelos, el 17 de diciembre de 1903, están muy bien documentados (recuadro 5.7, figura 5.8).

La patente (EE.UU. 821.393) no les fue concedida hasta mayo de 1906 y en realidad fue ampliamente infringida por diseñadores que comenzaron a construir sus propios aviones en todo el mundo. El progreso en el control y la duración de los vuelos fue rápido. El 20 de septiembre de 1904 los Wright realizaron su primer círculo completo. El 9 de noviembre de 1904 cubrieron casi 5 km (McCullough, 2015). Menos de 5 años después, el 25 de julio de 1909, tras un periodo de intensificación de la competencia internacional, Louis Charles Joseph Blériot (1872-1936), que previamente había construido el primer monoplano del mundo, cruzó el canal de la Mancha (Blériot, 2015). En 1914, las principales potencias militares del mundo ya tenían fuerzas aéreas incipientes, que se desplegaron y ampliaron en la Primera Guerra Mundial.

Cuando los motores de gasolina de encendido por chispa iban camino del éxito comercial, Rudolf Diesel (1858-1913) introdujo un modo totalmente diferente de encendido, patentado en 1892 (Diesel,

1913). En los motores diésel, el combustible inyectado en el cilindro se enciende espontáneamente debido a las altas temperaturas generadas por la ratio de compresión de 14-24, en comparación con la de solo 7-10 en los motores de gasolina de Otto. Aunque esto requiere un mayor peso del motor y menor velocidad, los diésel son inherentemente más eficientes. Incluso durante las primeras pruebas de certificación del motor, en febrero de 1897, la eficiencia del prototipo era superior al 25% (comparado con el 14-17% de los mejores motores de gasolina de la época). En 1911, esta tasa era superior al 40%, y hoy en día los mejores motores diésel tienen una eficiencia ligeramente superior al 50%, el doble que los motores de gasolina (Smil, 2010b). Además, los diésel utilizan un combustible más pesado y barato. El gasóleo es un 14% más pesado que la gasolina (820-850 g/l vs. 720-750 g/l) y su densidad de energía por masa es similar, lo que significa que su densidad de energía por volumen es de 36 MJ/l, un 12% más alta.

RECUADRO 5.7

Los primeros vuelos

Nueve días después de la segunda inmersión de Manly, los hermanos Wright probaron su planeador Flyer en Kitty Hawk. Se trataba de un frágil biplano canard (con el avión de cola situado delante de las alas) con un marco de madera de abeto y una cubierta de tela fina de algodón. Tenía una envergadura de 12 m y solo pesaba 283 kg. Un sistema de transmisión por cadenas accionaba dos hélices que giraban en direcciones opuestas. Orville fue el piloto durante el primer vuelo, realizado cerca de las 10:35. Iba acostado de frente en el ala inferior y dirigía el avión moviendo poleas que tiraban de los cables unidos a las alas y al timón. El primer vuelo solo duró 12 s y fue más bien un salto de 37 m.

El segundo vuelo, realizado después de reparar un esquí dañado durante el primer aterrizaje, fue de 53 m y el tercero, de 61 m. Durante el cuarto intento el avión comenzó a ascender y descender antes de que Wilbur recuperara el control. Después se estrelló de repente y rompió la estructura del timón

delantero, pero no antes de permanecer 57 s en el aire y recorrer 260 m. Antes de iniciar su viaje de regreso a Dayton, los Wright enviaron un telegrama a su padre, el reverendo Milton Wright: «Cuatro vuelos exitosos jueves mañana todos contra viento 31 millas iniciados desde Nivel únicamente con potencia motor velocidad media en aire 31 millas récord 57 segundos informa Prensa en casa por Navidad» (World Digital Library, 2014).

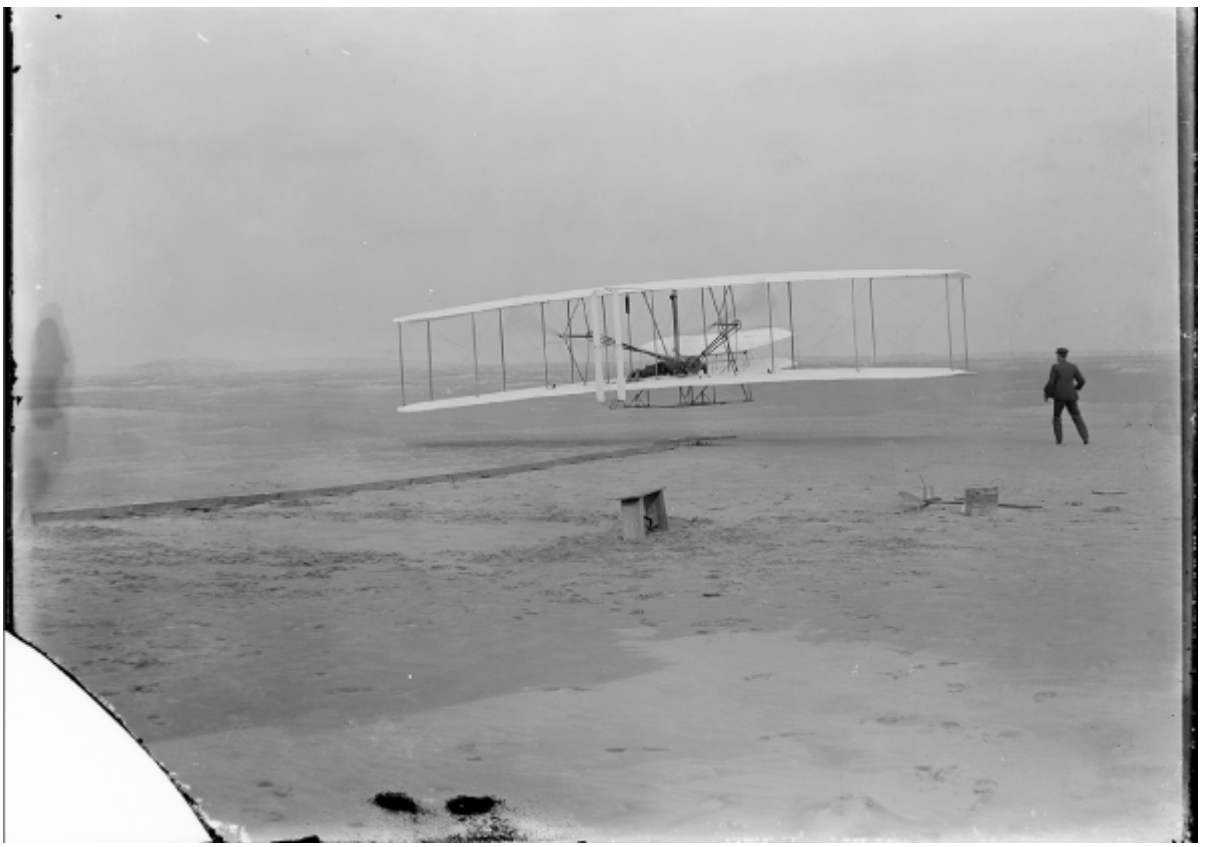


Figura 5.8 Imagen del primer vuelo de una máquina autopropulsada más pesada que el aire en Kitty Hawk, Carolina del Norte, a las 10:35 del 17 de diciembre de 1903, pilotada por Orville Wright. Fotografía de la Biblioteca del Congreso de Estados Unidos.

Diesel resolvió diseñar un motor de combustión interna más eficiente durante sus estudios universitarios, y en diciembre de 1892 se le concedió finalmente (después de dos rechazos) una patente

> para un motor de combustión interna caracterizado por el hecho de que en un cilindro de aire puro [...] el aire está tan comprimido

> por el pistón que la temperatura resultante es muy superior a la temperatura de ignición del combustible [...] y la adición de combustible [...] se produce de forma tan gradual que la combustión tiene lugar sin un aumento significativo de presión o temperatura, debido al movimiento exterior del pistón y la expansión del aire comprimido [...] (Diesel, 1893ª: 1)

Tal como se presentó, la patente no podía convertirse en un motor capaz de funcionar, pero en 1895 Diesel obtuvo una segunda patente y se aseguró entonces la ayuda práctica de Heinrich von Buz (1833-1918), director general de la principal empresa de ingeniería mecánica del país, y Friedrich Alfred Krupp (1854-1902), principal productor alemán de acero, que gastaron considerablemente en el desarrollo de una máquina útil. La prueba oficial de certificación, realizada el 17 de febrero de 1897 con un motor de 13,5 kW, indicó una eficiencia neta del 26,2% y una presión máxima de 34 atmósferas, una décima parte de las especificaciones originales de Diesel (Diesel, 1913). En otoño de 1897 el rendimiento por unidad era de hasta el 30,2%. Así pues, Diesel diseñó un mejor motor, y en buena medida alcanzó su sueño, aunque sus esperanzas iniciales respecto al impacto social del motor estaban completamente fuera de lugar —otro ejemplo de las consecuencias inesperadas de un avance técnico (recuadro 5.8)—.

La comercialización de este nuevo motor fue más lenta de lo previsto inicialmente, con menos de 300 unidades vendidas a finales de 1901 (Smil, 2010b). En 1903 el primer barco con motor diésel, el pequeño petrolero Vandal, comenzó a operar en el mar Caspio y el Volga; en 1904 se inauguró en Kiev la primera estación de generación de electricidad con motor diésel y el Aigrette francés se convirtió en el primer submarino propulsado por un motor diésel. Pero el gran avance llegó en febrero de 1912, cuando el Selandia danés (un buque de carga y pasajeros de 6.800 TPM) se convirtió en el primer transatlántico diésel. Un año antes de su muerte, a mediados de 1912, Diesel escribió: «Ahora existe una nueva expresión en los círculos

navales: “ir a diésel”. No hacemos nada más que utilizar diésel, dicen en todas partes» (Diesel, 1937: 421).

Con todo, el rápido éxito de los motores de combustión interna —utilizados en vehículos de carretera, aviones y barcos, y también para tareas agrícolas a medida que tractores, cosechadoras y bombas de riego comenzaron a sustituir a los animales de tiro en la agricultura occidental— no puso fin a la era del vapor. Antes de que terminara el siglo XIX, empezó a comercializarse una nueva fuente de generación de energía cuyo desarrollo posterior en buena medida determinó los avances industriales del siglo XX. Ese invento trascendental fue la turbina de vapor, que pronto demostró ser un método extraordinario para hacer funcionar generadores de electricidad en centrales cada vez más grandes.

Electricidad

La comprensión sistemática de las propiedades y leyes fundamentales de la electricidad requirió la labor de muchos científicos e ingenieros europeos y americanos durante la última parte del siglo XVIII y las seis primeras décadas del siglo XIX, y en muchos casos sus contribuciones fueron reconocidas utilizando sus apellidos para dar nombre a las unidades físicas básicas. Entre los hitos famosos del siglo XVIII cabe mencionar los experimentos de Luigi Galvani (1737-1798) con ancas de rana durante la década de 1790 (y, por tanto, su errónea noción de «electricidad animal»), los estudios de Charles Augustin Coulomb (1736-1806) sobre la fuerza eléctrica (el culombio es ahora la unidad estándar de carga eléctrica), y la construcción de la primera batería eléctrica por Alessandro Volta (1745-1827) (el voltio es la unidad de potencial eléctrico).

RECUADRO 5.8

El motor diésel: intención y resultados

Diesel quería producir un motor ligero, pequeño (del tamaño de una máquina de coser contemporánea) y barato que pudiera ser adquirido por empresarios independientes (maquinistas, relojeros, propietarios de restaurantes) y permitiera una amplia descentralización de la industria, uno de sus grandes sueños sociales:

> No cabe duda de que es mejor descentralizar al máximo la pequeña industria y tratar de implantarla alrededor de las ciudades, o incluso en el campo, en lugar de concentrarla en grandes ciudades, donde la gente se amontona sin aire, luz o espacio. Este objetivo solo es viable con un motor independiente y fácil de instalar (el que aquí se propone). No hay duda de que este nuevo motor puede generar un desarrollo de la pequeña industria mucho más sólido que las tendencias actuales, que son indeseables por motivos económicos, políticos, humanitarios e higiénicos. (Diesel, 1893b: 89)

Una década más tarde, en *Solidarismus: Natürliche wirtschaftliche Erlösung des Menschen* (Diesel, 1903), Diesel defendió las fábricas dirigidas por trabajadores y soñó con una era de honestidad, justicia, paz fraternal, compasión y amor, y vio las cooperativas de trabajadores como colmenas y a los propios trabajadores como abejas con tarjetas de identificación y contratos. Pero solo se vendieron 300 de los 10.000 ejemplares impresos del libro, y las sociedades modernas no se han organizado en torno a las cooperativas de trabajadores. Diesel le dijo a su hijo que su «principal logro es haber resuelto la cuestión social» (Diesel, 1937: 395). Sin embargo, la verdad es que sus motores no se utilizaron en pequeños talleres, sino en maquinaria pesada, camiones y locomotoras y, después de la Segunda Guerra Mundial, en grandes petroleros, graneleros y barcos de transporte, contribuyendo así a lo contrario de la visión de Diesel, una concentración sin precedentes de la fabricación en masa y la distribución barata de productos en una nueva economía mundial (Smil, 2010b).

En 1819 Hans Christian Ørsted (1777-1851) descubrió el efecto magnético de las corrientes eléctricas (el oersted es ahora una unidad de campo magnético), y durante la década de 1820 André-Marie Ampère (1775-1836) formuló el concepto de un circuito completo y cuantificó los efectos magnéticos de la corriente eléctrica (el amperio

es la unidad de la corriente eléctrica). Pero ninguno de estos descubrimientos de principios del siglo XIX fue más importante que la demostración de la inducción electromagnética de Michael Faraday (1791-1867) (figura 5.9). Faraday se propuso responder a una simple pregunta: si, como demostró Ørsted, la electricidad induce el magnetismo, ¿puede el magnetismo inducir la electricidad? Disponemos de la fecha exacta y una descripción detallada de la respuesta que descubrió (recuadro 5.9).

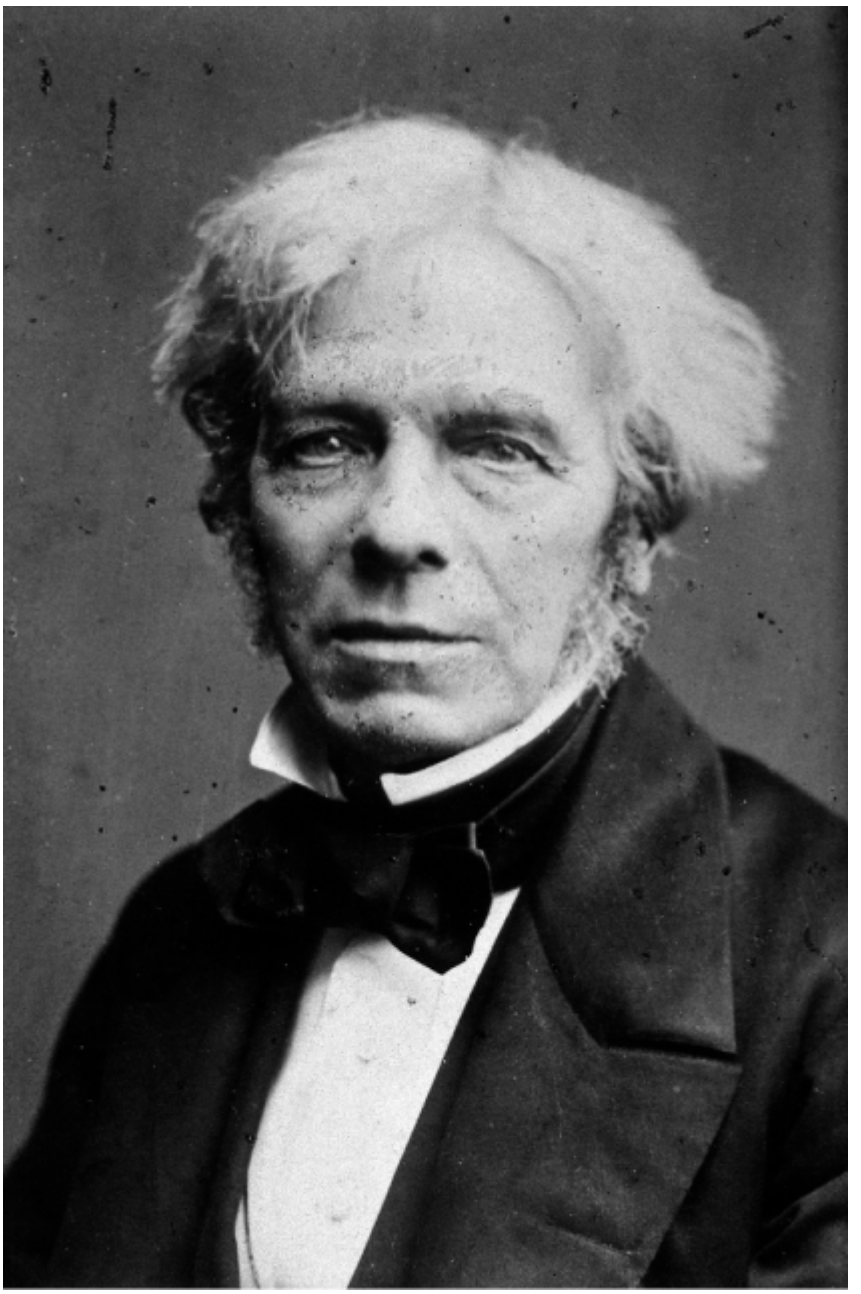


Figura 5.9 Michael Faraday. Biblioteca Wellcome, Londres, fotografía.

RECUADRO 5.9

Faraday y el descubrimiento de la inducción electromagnética

Faraday, asistente autodidacta de la Royal Institution, habiendo trabajado principalmente con Humphry Davy (1778-1829), el primer científico en describir el arco eléctrico formado por una ligera separación de 2 electrodos de

carbono, publicó su primer trabajo importante sobre la electricidad (sobre la rotación electromagnética) en 1821, cuando esbozó el principio del motor eléctrico. Comenzó una nueva serie de experimentos en 1831, que finalmente condujo al descubrimiento de la inducción electromagnética el 17 de octubre de 1831. Preocupado de que sus resultados tuvieran que ver con un fallo en el diseño del experimento, llevó a cabo la prueba definitiva usando una técnica diferente, produciendo corriente continua. Faraday presentó los resultados en una conferencia de la Royal Society el 24 de noviembre de 1831. Así es como los describió en *Investigaciones experimentales de electricidad* (Faraday, 1832: 128):

> En los experimentos anteriores, los cables se colocaron cerca el uno del otro, y el contacto del cable inductor con la batería se hizo en el momento en que se requería el efecto inductivo; pero como podría ser que se ejerciera alguna acción particular en el instante en que se hace y se deshace el contacto, la inducción se produjo de otra manera. Se estiró un buen pedazo de cable de alambre de cobre en amplios zigzags, representando la letra W, sobre la superficie de un tablero; se estiró un segundo alambre con la misma forma sobre un segundo tablero, de manera que, al acercarse, los alambres se tocaran en toda su longitud, excepto por una hoja de papel grueso que se interpuso entre ambos. Uno de los cables estaba conectado con el galvanómetro y el otro con una batería voltaica. Se movió el primer cable hacia el segundo y, al acercarse, la aguja se desvió. Al retirarse el cable, la aguja se desvió en la dirección opuesta. Al acercar y alejar los alambres al mismo tiempo que las vibraciones de la aguja, esta última pronto comenzó a moverse muchísimo; al dejar de mover los alambres, pronto la aguja del galvanómetro volvió a su posición habitual.
>
> Cuando los alambres se acercaban el uno al otro, la corriente inducida iba en la dirección contraria de la corriente preexistente. Cuando los alambres se alejaban el uno del otro, la corriente inducida iba en la misma dirección que la corriente preexistente. Cuando los cables permanecían quietos, no había corriente inducida.

La demostración de Faraday de que la energía mecánica puede convertirse en electricidad (para generar corriente alterna) y viceversa abrió el camino para la producción y conversión de electricidad no dependiente (o no limitada por) pesadas baterías de baja densidad

energética. Pero pasaron décadas hasta que el esfuerzo combinado de mucha gente convirtiera esta tecnología en una realidad comercial. Cuando Julio Verne (1828-1905) publicó *Veinte mil leguas de viaje submarino*, hizo que el capitán Nemo le explicara a Aronnax que «existe un agente poderoso, obediente, veloz, fácil, que se adapta a cualquier uso, y este agente reina de manera suprema a bordo de mi nave. La enciende, la calienta… Todo se hace con él. Es el alma de este aparato mecánico. Este agente es la electricidad». En 1870, esto era ciencia ficción, pues la electricidad todavía no podía generarse a gran escala y la capacidad de los motores eléctricos estaba limitada por la energía que pudieran suministrar pequeñas baterías.

Este retraso no es en absoluto sorprendente porque la generación de electricidad, su transmisión y su conversión en calor, luz, movimiento y potencial químico representaron un logro sin precedentes en la historia de la innovación energética. Anteriormente, las nuevas fuentes de energía y los nuevos motores primarios habían sido diseñados para realizar tareas específicas de forma más rápida, más barata o con mayor potencia y podían utilizarse fácilmente dentro de los esquemas productivos existentes (por ejemplo, las piedras de molino podían girarse utilizando ruedas hidráulicas en lugar de animales). En cambio, la introducción de la electricidad requería la invención, el desarrollo y la instalación de un nuevo sistema global para generarla de manera fiable y asequible, transportarla de manera segura por medio de la transmisión a larga distancia, distribuirla localmente a los clientes y finalmente convertirla de manera eficiente a fin de suministrar el tipo de energía deseada por los usuarios.

La comercialización de la electricidad comenzó con la búsqueda de mejores luces. Aunque Davy demostró el efecto de arco en 1808, las primeras lámparas de arco eléctrico se encendieron brevemente en la plaza de la Concordia, en París, en diciembre de 1844, y luego en el pórtico de la National Gallery, en Londres, en noviembre de 1848. En 1871, Zénobe Gramme (1826-1901) presentó el primer dinamizador de armazón de anillo —la llamó la «*nouvelle machine magnéto-*

électrique produisant du courant continu»— en la Academia de Ciencias de París (Chauvois, 1967). Este diseño abrió el camino a las lámparas de arco alimentadas por electricidad generada por dinamos: a partir de 1877 estas lámparas iluminaron lugares públicos emblemáticos de París y Londres, y a mediados de la década de 1880 ya habían llegado a muchas ciudades europeas y americanas (Figuier, 1888; Bowers, 1998). Sin embargo, requerían controles para mantener un arco estable (porque la corriente consume el electrodo positivo), no eran adecuadas para usos interiores y, además, el reabastecimiento de los electrodos gastados suponía un gran desafío logístico: cada kilómetro de carretera urbana iluminado por lámparas de arco de 500 W separadas por 50 m de distancia las unas de las otras requería anualmente 3,6 km de electrodos de carbono de 15 y 9 mm de grosor (Garcke, 1911).

La conquista de la iluminación producida por filamentos brillantes requirió seis décadas —desde los experimentos de William de La Rue en 1820 con una bobina de platino hasta 1879, cuando Edison reveló su primera bombilla de filamentos de carbono duradero (Edison, 1880)— y en ella participaron dos docenas de prominentes (y hoy olvidados) inventores de Reino Unido, Francia, Alemania, Rusia, Canadá y Estados Unidos (Pope, 1894; Garcke, 1911; Howell y Schroeder, 1927; Friedel e Israel, 1986; Bowers, 1998). Debo señalar como mínimo a Hermann Sprengel, que inventó la bomba de vapor de mercurio para producir un alto vacío en 1865; Joseph Wilson Swan (1828-1914), que comenzó su trabajo en 1850 y finalmente en 1880 obtuvo la patente para una lámpara de filamento de carbono en Reino Unido; y los canadienses Henry Woodward y Matthew Evans, cuya patente de 1875 sirvió de base para el trabajo de Edison. En tal caso, ¿por qué los logros de Edison superaron con creces los de sus muchos predecesores y competidores?

Edison triunfó porque se dio cuenta de que la carrera no consistía únicamente en inventar una primera bombilla fiable, sino en poner en marcha una infraestructura comercial de alumbrado eléctrico, lo cual

incluía la generación, transmisión y medición fiable de electricidad (Friedel e Israel, 1986; Smil, 2005). Como consecuencia de ello, es justo decir que la creación de la industria eléctrica fue impulsada, más que en ningún otro caso de innovación durante el siglo XIX, por la visión de un único hombre. Ello requirió la identificación precisa de problemas técnicos, su resolución mediante tenaces procesos multidisciplinares de investigación y desarrollo, y la rápida introducción en el mercado de las innovaciones resultantes (Jehl, 1937; Josephson, 1959). Existieron otros inventores de bombillas y grandes generadores eléctricos en la misma época, pero solo Edison tuvo tanto la visión de un sistema completo como la determinación y el talento organizativo para conseguir que todo funcionara adecuadamente (recuadro 5.10, figura 5.10).

Esto sigue siendo innegable: Edison fue un hombre excepcionalmente inventivo y resolutivo (su fuerza mental solo fue superada por su legendaria resistencia física) cuyas contradictorias cualidades como innovador racional y entregado, por un lado, y dudoso «vendemotos» egocéntrico, por el otro, podían inspirar y asustar a quienes trabajaban con él. Y nunca hubiera podido lograr tantas cosas sin la generosa financiación de algunos de los empresarios más ricos de su época —aunque hay que repetir que hizo buen uso de esa inversión: su laboratorio de Menlo Park exploró muchas nuevas opciones y prototipos, de tal manera que puede considerarse que fue el precursor de los centros corporativos de I+D cuyas innovaciones fueron tan importantes durante el siglo XX—.

El 21 de octubre de 1879, la primera bombilla de Edison —un filamento de carbono en alto vacío— emitió luz constante de manera duradera. El 31 de diciembre de 1879, Edison hizo una demostración con 100 bombillas en Menlo Park, iluminando el laboratorio, las calles cercanas y la estación de ferrocarril. Aunque las primeras bombillas eran muy ineficientes, su rendimiento era superior al de cualquier otra fuente de luz de la época: eran unas diez veces más brillantes que una camisa incandescente y cien veces más brillantes

que una vela. Este enorme avance en el campo de la iluminación no fue menos importante para la modernización industrial y la mejora de la calidad de vida que la invención de mejores motores.

La bombilla duradera fue solo el principio: en los tres años posteriores a su inauguración, Edison presentó casi noventa nuevas patentes para filamentos y lámparas, sesenta vinculadas con máquinas magneto-eléctricas o dinamo-eléctricas, catorce con el sistema de iluminación, doce con la distribución de electricidad y diez con medidores y motores eléctricos (Thomas Edison Papers, 2015). Al mismo tiempo, él y todo su equipo tradujeron estas ideas en realidades concretas en un periodo asombrosamente breve. La primera planta de generación de electricidad, construida por la compañía londinense de Edison en el Viaducto de Holborn, comenzó a transformar energía el 12 de enero de 1882. La estación de Pearl Street de Nueva York, puesta en marcha el 4 de septiembre del mismo año, fue la primera central térmica americana. Un mes después de su apertura, hacía funcionar unas 1.300 bombillas situadas en el distrito financiero de la ciudad. Y solo un año más tarde ya se habían conectado 11.000 puntos de luz más.

RECUADRO 5.10

El sistema eléctrico de Edison

La primera bombilla eléctrica estable y duradera de la historia, presentada por Joseph Swan en Newcastle-on-Tyne el 18 de diciembre de 1878, tenía los mismos componentes clave que la primera bombilla que Edison patentaría 10 meses después: cables de platino y un filamento de carbono (Electricity Council, 1973; Bowers, 1998). Pero los filamentos de Swan tenían una resistencia muy baja (<1-5 Ω). Su uso a gran escala habría requerido voltajes muy bajos y, por tanto, corrientes muy altas y cables de transmisión muy pesados. Además, las bombillas preedisonianas estaban conectadas en serie y su fuente de energía era la corriente constante de una dinamo, lo que hacía que fuera imposible encender una bombilla individualmente, así como que todo el sistema se apagara con una sola interrupción. Edison se dio cuenta de que un

sistema de iluminación económicamente viable debía minimizar el consumo de electricidad con filamentos de alta resistencia conectados en paralelo dentro de un sistema de tensión constante.

Este concepto contradecía por completo el consenso técnico de la época (Jehl, 1937), pero una simple comparación ilustra las consecuencias prácticas de ambos enfoques. Los ajustes preedisonianos habituales (una lámpara de 100 W y 2 Ω) requerían 7 A. La elección de Edison de 140 Ω requería solo 0,85 A, reduciendo muchísimo el coste de los cables de cobre (Martin, 1922). Como expuso Edison en su solicitud de patente presentada el 12 de abril de 1879: «El uso de bombillas con tanta resistencia me permite colocar muchas de ellas en arco múltiple sin llevar la resistencia total del conjunto a un punto tan bajo que requiera un gran conductor principal; al contrario, me permite utilizar un conductor principal de dimensiones muy moderadas» (Edison, 1880: 1). La ley de Ohm implica que las especificaciones de Edison exigían un suministro de 118 V. Ese mismo voltaje (110-120 V) sigue siendo el estándar norteamericano (y japonés), mientras que los países de Europa funcionan con un voltaje de 240 V.

Con todo, el veredicto no es unánime. Estoy de acuerdo con Hughes (1983: 18) en que «Edison fue un creador holístico y un resuelto solucionador de los problemas asociados con el crecimiento de los sistemas. [...] Los conceptos de Edison surgieron de su necesidad de encontrar principios organizativos que fueran lo suficientemente poderosos para integrar y fijar una dirección clara para diversos factores y componentes». Pero Friedel e Israel (1986: 227) llegaron a la conclusión de que «la completitud del sistema fue más el resultado de las oportunidades generadas por los avances técnicos y los recursos financieros que de un enfoque sistemático con un objetivo claro».

Figura 5.10 Thomas E. Edison en 1882, el año en que su primera central de generación de electricidad de carbón comenzó a funcionar en el bajo Manhattan. Fotografía de la Biblioteca del Congreso.

Hay dos verdades que me parecen particularmente notables. La primera es la combinación de intuiciones (*insights*) y la calidad del trabajo terminado, que hizo que el sistema de Edison fuera tan exitoso y completo como para que sus parámetros básicos todavía sigan vigentes. A pesar de las críticas y los interrogantes (véase recuadro 5.9), todos los que sabían lo difícil que era diseñar un sistema tan complejo *de novo* siempre apreciaron el logro de Edison. El mayor homenaje quizá provino de Emil Rathenau, fundador de Allgemeine

Elektrizitäts Gesselschaft, el mayor fabricante de equipos eléctricos de Alemania y uno de los principales pioneros de la industria eléctrica europea, hoy conocida como AEG. En 1908 rememoró sus impresiones durante la Exposición Eléctrica de París de 1881:

> El sistema de iluminación de Edison fue tan bellamente concebido hasta los más mínimos detalles y tan minuciosamente elaborado que parecía que hubiera sido testeado durante décadas en varias ciudades. No faltaban ni enchufes, ni interruptores, ni fusibles, ni portalámparas, ni ningún otro accesorio necesario para completar la instalación; y la generación de corriente, la regulación, el cableado con cajas de distribución, las conexiones de la casa, los contadores, etc., todo mostraba signos de una asombrosa habilidad y un genio incomparable. (En Dyer y Martin, 1929: 318-319)

La segunda «verdad» es aún más notable. Por muy variado y fundamental que fuera el trabajo de Edison, no habría bastado por sí solo para crear un sistema eléctrico moderno completo, duradero y eficiente. Todas las innovaciones necesarias llegaron en un periodo de tiempo muy corto (casi todas durante la milagrosa década de 1880) y además de un modo casi óptimo: más de 120 años después, los principales componentes de nuestros sistemas eléctricos —turbogeneradores de vapor, transformadores y transmisión de corriente alterna (CA) de alta tensión— han aumentado en eficiencia, capacidad y fiabilidad, pero su diseño fundamental y sus propiedadessiguen siendo los mismos, y sus creadores reconocerían fácilmente las últimas mejoras respecto de sus propias creaciones.

Y si bien la luz incandescente ha sido superada por la fluorescente (comercializada durante la década de 1930), y más recientemente por fuentes de luz aún más eficientes (vapor de sodio, lámparas de azufre, diodos emisores de luz), los motores eléctricos, otro componente clave del sistema desde la década de 1880, son piezas cada vez más comunes

del sistema eléctrico mundial. Por eso debo examinar más de cerca las cuatro innovaciones o inventos críticos no edisonianos que ayudaron a transformar el inmenso potencial teórico de la electricidad en una realidad social y económica inequívoca: las turbinas de vapor, los transformadores, los motores eléctricos y la transmisión mediante corriente alterna.

Ya he hablado de la elevada relación masa/potencia de los motores de vapor y su limitado rango de potencia. Este tipo de motor primario, que también era voluminoso y bastante ineficiente, fue abandonado poco después de que Charles Parsons (1854-1931) patentara una turbina de vapor más eficiente, pequeña y ligera en 1884 (Parsons, 1936). La compañía de Parsons instaló una turbina de 75 kW en una estación de Newcastle en 1888 y progresó hasta instalar una unidad de 1 MW en la estación alemana de Elberfeld en 1900; la máquina más grande que instaló Parsons antes de la Primera Guerra Mundial, en Chicago, en 1912, tenía una potencia de 25 MW (Smil, 2005). Mientras que los motores de vapor rara vez funcionaban a más de unos pocos cientos de rpm, las turbinas modernas alcanzan las 3.600 rpm y pueden trabajar con una presión de 34 MPa y vapor supercalentado a 600 °C, lo que genera eficiencias de hasta el 43 % (Termuehlen, 2001; Sarkar, 2015). También pueden construirse motores que van desde unos pocos kW hasta más de 1 GW y, por tanto, cubren necesidades que van desde la conversión de calor residual en electricidad a pequeña escala hasta los enormes turbogeneradores de las centrales nucleares.

Los transformadores son máquinas comunes e indispensables en el mundo moderno —hicieron posible la generación de electricidad centralizada y barata— y al mismo tiempo están totalmente ausentes del imaginario colectivo (Coltman, 1988). Suelen estar escondidos (bajo tierra, dentro de un edificio o detrás de una valla elevada) y ser silenciosos y estacionarios. La primera transmisión eléctrica de corriente continua (CC) desde una central a los consumidores tuvo un alcance limitado. Extender la transmisión más allá del límite de los

400 m^2 hubiera requerido la instalación de enormes conectores, que, como concluyó Siemens (1882: 70), «ya no podrían colocarse en canales estrechos situados debajo de las aceras, sino que exigirían la construcción de costosos subterráneos —auténticas *cavae electrica*—». La única alternativa habría sido la construcción de numerosas estaciones, cada una dedicada a una zona muy limitada. Cualquiera de estas dos opciones hubiera sido costosísima. Los transformadores de CA proporcionaron una solución barata y fiable (recuadro 5.11).

Como ya hemos dicho, los transformadores funcionan por inducción electromagnética, proceso descubierto por Faraday. Su desarrollo no fue el resultado de un invento innovador, sino de mejoras graduales basadas en la visión fundamental de Faraday. En 1883, Lucien H. Gaulard (1850-1888) y John D. Gibbs crearon un influyente diseño inicial. Posteriormente tres ingenieros húngaros lo mejoraron utilizando núcleos de hierro cerrados. Pero fue William Stanley (1858-1916), un joven ingeniero empleado por Westinghouse, quien en 1885 desarrolló un prototipo del dispositivo que todavía utilizamos en la actualidad que permite transmitir CA de alta tensión desde una central eléctrica con pérdidas relativamente pequeñas y distribuirla a baja tensión hasta los clientes (Coltman, 1988).

RECUADRO 5.11

Transformación de la electricidad y pérdidas de transmisión

La electricidad se genera de manera más eficiente y se convierte más convenientemente en usos finales a voltajes bajos, pero, debido a que la pérdida de potencia en la transmisión aumenta con el cuadrado de la corriente transmitida, es mejor utilizar voltajes elevados para limitar las pérdidas de transmisión. Los transformadores convierten una corriente eléctrica en otra, ya sea reduciendo o aumentando el voltaje del flujo de entrada, y lo hacen sin apenas pérdida de energía y en un amplio rango de voltajes (Harlow, 2012). Unos sencillos cálculos ilustran las ventajas del proceso. La potencia de la electricidad transmitida es el producto de la corriente y el voltaje (vatios =

amperios × voltios); el voltaje es el producto de la corriente y la resistencia (ley de Ohm, V = AΩ), y, por tanto, la potencia es el producto de A2Ω.

La pérdida de potencia (resistencia) corresponde, pues, al cuadrado inverso del voltaje: si multiplicamos el voltaje por 10, la resistencia de la línea será de solo 1/100 cuando se transmita electricidad a la misma velocidad. En teoría, esto debería favorecer trabajar siempre con el voltaje más alto posible, pero en la práctica el crecimiento del voltaje está limitado por otras consideraciones (efecto corona, mayor exigencia de aislamiento, tamaño de las torres de transmisión), aunque la transmisión de alta tensión y extraalta tensión se hace ahora rutinariamente a 240.000-750.000 V (240-750 kV), con pérdidas de menos del 7% de la electricidad transmitida.

Como ocurrió con otros componentes de los nuevos sistemas eléctricos, las capacidades y voltajes de los transformadores crecieron rápidamente durante el resto del siglo XIX y antes de la Primera Guerra Mundial. No creo que exista una mejor valoración de este sencillo pero ingenioso dispositivo que la que realizó Stanley en 1912, en un discurso en el Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos:

> Es una solución completísima y sencilla para un problema muy complejo. Hace palidecer a cualquier intentona mecánica de regulación. Maneja las enormes cargas de energía que se le dan o quitan instantáneamente con asombrosa facilidad, certeza y eficiencia. Es increíblemente fiable, fuerte y segura. Es una mezcla de acero y cobre en la que fuerzas extraordinarias están tan bien equilibradas que son casi insospechables. (Stanley, 1912: 573)

Los transformadores fueron esenciales para la elección de la CA como estándar de las nuevas redes eléctricas. La CC era una elección lógica para las primeras minirredes aisladas limitadas a partes de ciudades, y además existía una innegable preocupación respecto a la seguridad de la CA de alta tensión. Pero ninguna de las dos justificaba la agresiva campaña anti-CA de Edison, que comenzó en 1887 e incluía la electrocución de perros y gatos callejeros en una lámina de metal cargada con 1 kV de un generador de CA (para demostrar los

peligros mortales de la CA) y los ataques personales a George Westinghouse (1846-1914), principal empresario industrial de Estados Unidos, empleador de Stanley y uno de los primeros promotores de la CA.

En 1889, Edison llegó a escribir lo siguiente: «Mi deseo personal sería prohibir por completo el uso de la CA. Es tan innecesaria como peligrosa [...] y, por tanto, no veo justificación alguna para la introducción de un sistema que no tiene ninguna opción de ser sostenible y, en cambio, presenta numerosos peligros para la vida y la propiedad» (Edison, 1889: 632). Edison encontró un sorprendente aliado para su lucha contra la CA en el británico Lord Kelvin, físico de reputación mundial. Un año más tarde, Edison defendió públicamente la CC. David (1991) ofrece la mejor explicación de este posicionamiento, argumentando que la oposición aparentemente irracional de Edison era en realidad una decisión racional para optimizar el valor de sus empresas —que se comprometieron a producir componentes de sistemas basados en la CC— y, por tanto, mejorar las condiciones de venta de las acciones que todavía tenía. Una vez vendidas, el conflicto cesó abruptamente.

La famosa «guerra de las corrientes» concluyó como cabía esperar: los fundamentos de la física favorecían a la CA, y después de 1890 los nuevos sistemas estuvieron basados en la CA (el cambio se vio favorecido por la introducción de un medidor de CA preciso y barato en 1889), mientras que los sistemas de CC existentes, que en 1891 suministraban más de la mitad de la iluminación urbana de Estados Unidos, pudieron pasar a la CA gracias a la invención del convertidor rotativo, patentado por Charles S. Bradley, antiguo empleado de Edison, en 1888: este convertidor permitía utilizar los equipos de generación de CC existentes y al mismo tiempo transmitir la CA de alta tensión en áreas más amplias. La expansión de la CC de alta tensión se vio acelerada por unos pocos proyectos de gran escala durante la década de 1890 —incluida la gran estación de Deptford de Londres, de la cual dependían más de 200.000 puntos de luz— y por

el desarrollo del mayor enlace de CA del mundo, desde una central hidroeléctrica situada en las cataratas del Niágara hasta la ciudad de Búfalo (Hunter y Bryant, 1991). En 1900 un primer suministro público utilizó la corriente trifásica, y el voltaje de transmisión alcanzó 60 kV en 1900 y 150 kV en 1913. Así, todos los componentes clave de la generación y transmisión de electricidad modernas existían ya antes de la Primera Guerra Mundial.

Tres años después de que apareciera el transformador de Stanley, Nikola Tesla patentó el primer auténtico motor de inducción polifásico que funcionaba con CA (Cheney, 1981; figura 5.11). Al igual que ocurrió con el desarrollo de las bombillas incandescentes, este invento llegó después de décadas de experimentos, pruebas e incluso el despliegue comercial de diseños de motores de CC alimentados por baterías a finales de la década de 1830 y más tarde, a finales de la década de 1870, también por dinamos (Hunter y Bryant, 1991). El alto coste operativo y la limitada capacidad de las baterías imposibilitaron que los pequeños motores de CC compitieran con los de vapor.

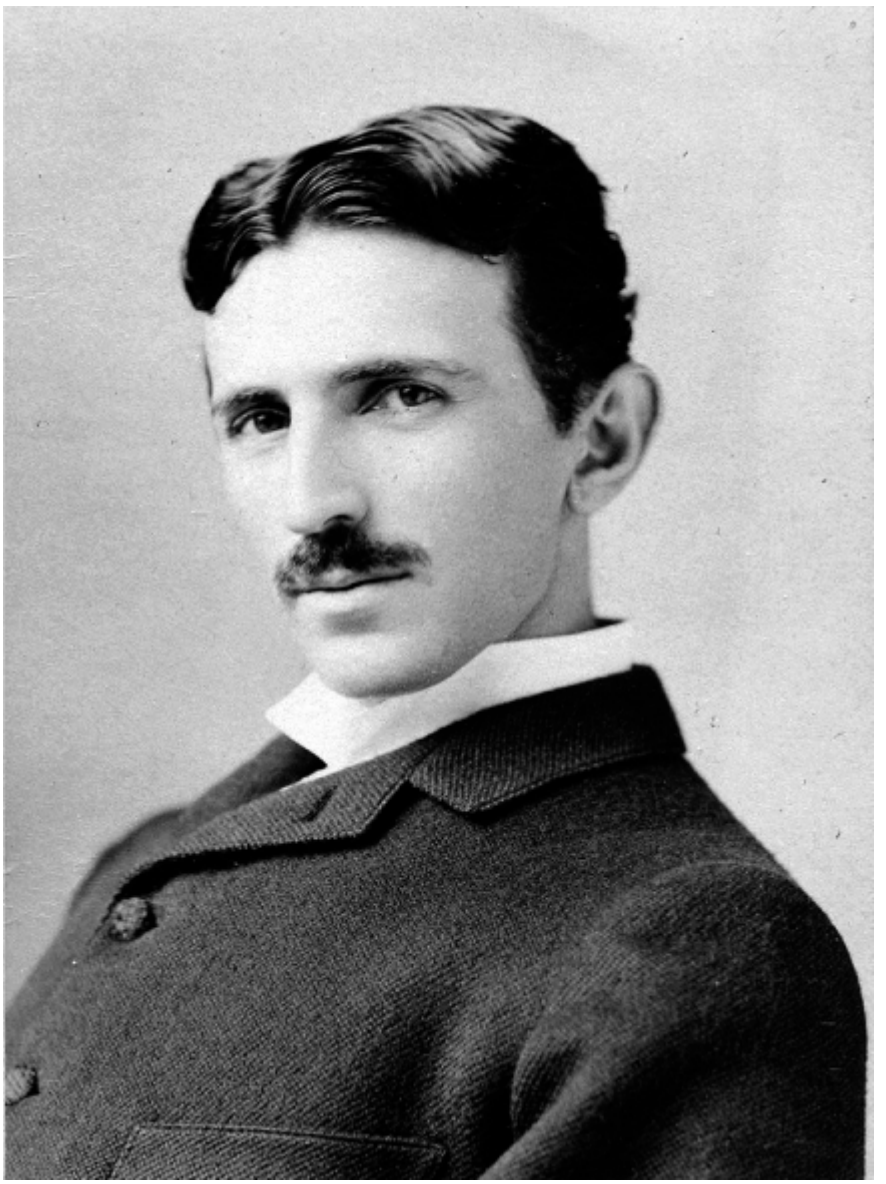


Figura 5.11 Nikola Tesla en 1890. Fotografía de Napoleón Sarony.

El primer pequeño motor eléctrico de CC en obtener éxito comercial (del que se vendieron miles de unidades) también funcionaba con una voluminosa batería y fue patentado por Edison en 1876; debía montarse encima de un lápiz para accionar una pluma fabricadora de plantillas que se utilizaba para la duplicación mecánica de monumentos (Pessaroff, 2002). Una vez que se dispuso de grandes dinamos, también se intentó utilizar pequeños motores de CC para accionar tranvías (primero en Alemania) y para muchas tareas

industriales (sobre todo en Estados Unidos). Las perspectivas solo cambiaron drásticamente con el invento de Nikola Tesla (1857-1943), conceptualizado en Europa y convertido en una máquina funcional después de que el joven ingeniero serbio emigrara a Estados Unidos.

Tesla afirmó que su idea original surgió en 1882, pero después de su emigración a Estados Unidos, Edison, su primer empleador estadounidense, mostró poco interés en la CA. Sin embargo, Tesla no tuvo dificultades para conseguir financiación, abriendo su propia empresa en 1887 y registrando todas las patentes necesarias —cuarenta de ellas entre 1887 y 1891—. El objetivo de Tesla al diseñar su motor polifásico era lograr

> una mayor eficiencia de conversión de la que ha existido nunca para construir aparatos más baratos, fiables, sencillos y fáciles de gestionar, de tal manera que se evite cualquier peligro relacionado con el uso de una corriente de alta tensión, necesario para que la transmisión resulte económica. (Tesla, 1888: 1)

Westinghouse compró todas las patentes de CA de Tesla en julio de 1888 y en 1889 la compañía ya tenía un primer dispositivo eléctrico alimentado por un motor de Tesla: un pequeño ventilador alimentado por un motor de CA de 125 W; en 1900 ya se habían vendido casi 100.000 unidades (Hunter y Bryant, 1991). La primera patente de Tesla fue para una máquina bifásica, y el primer diseño trifásico fue construido por Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrowolsky (1862-1919), un ingeniero ruso que trabajaba para AEG. Los motores trifásicos (con cada fase desfasada en 120°) garantizan que una de las tres fases esté siempre en su punto máximo o cerca de él, lo que genera una potencia más uniforme que la de un diseño bifásico y casi tan buena como la de un motor de cuatro fases, que, sin embargo, requiere otro cable. Como explico en la siguiente sección, el éxito comercial de los motores trifásicos creó rápidamente una importante transformación del mundo de la fabricación.

La gran transición de los combustibles tradicionales de fitomasa a los combustibles fósiles y de las fuentes de energía animadas a las mecánicas trajo consigo cambios sin precedentes tanto por sus nuevas cualidades, verdaderamente trascendentales, como por la velocidad de adopción. En 1800, los habitantes de París, Nueva York o Tokio vivían en un mundo cuyos fundamentos energéticos no eran diferentes de los de 1700 o incluso 1300: la madera, el carbón, el trabajo duro y los animales de tiro servían para todo. En 1900, en las grandes ciudades occidentales mucha gente vivía en sociedades cuyos parámetros técnicos eran casi totalmente diferentes de los que dominaban el mundo en 1800 y, en sus aspectos fundamentales, mucho más cercanos a nuestras vidas actuales. Como resumió el historiador Lewis Mumford (1967: 294): «Potencia, velocidad, movimiento, estandarización, producción en masa, cuantificación, regimentación, precisión, uniformidad, regularidad astronómica y control —sobre todo control— se convirtieron en las señas de identidad de la sociedad moderna occidental».

Abundan los ejemplos de este tipo de cambio. He seleccionado solo unas pocas mejoras globales para ilustrar la magnitud de estos avances. Al nivel más fundamental, en 1800 se consumían alrededor de 20 EJ de energía en el mundo (equivalente a menos de 500 Mt de petróleo), de los cuales el 98% era fitomasa, principalmente leña y carbón vegetal; en 1900, el suministro total de energía primaria se había duplicado con creces (hasta 43 EJ, equivalente a más de 1 Gt de petróleo), y la mitad de esa energía provenía de combustibles fósiles, principalmente carbón. En 1800, el motor primario inanimado más potente del mundo —el motor de vapor mejorado de Watt— tenía una capacidad algo superior a 100 kW; en 1900, los motores de vapor más grandes tenían una potencia de 3 MW (30 veces más). En 1800, el acero era una rareza; en 1850, «se comercializaba en cantidades comparativamente muy limitadas» (Bell, 1884: 435), incluso en Reino

Unido, y solo se producían algunos cientos de miles de toneladas al año en todo el mundo; en 1900, la producción mundial era de 28 Mt (Smil, 2016).

Nótense los términos «casi» y «en sus aspectos fundamentales» empleados para describir el mundo de 1900. La transformación fue muy profunda tanto en términos cualitativos como cuantitativos, y el ritmo al que ocurrió fue verdaderamente sorprendente. Al mismo tiempo, el mundo de los combustibles fósiles y los motores inanimados era todavía muy nuevo, a menudo resultaba muy ineficaz y conllevaba muchos impactos medioambientales negativos. En 1900, Estados Unidos y Francia ya eran sociedades abrumadoramente fósiles, pero el mundo en su conjunto todavía obtenía la mitad de su energía primaria de la madera, el carbón vegetal y los residuos de cultivos. Curiosamente, todavía faltaban 17 años para que incluso Estados Unidos alcanzara su propio récord de caballos de tiro disponibles. Y aunque las bombillas incandescentes, los motores eléctricos y los teléfonos avanzaban rápidamente, la mayor parte de la electricidad utilizada por las familias en las ciudades de Estados Unidos o Alemania solo permitía encender unas pocas bombillas.

Los cimientos de un nuevo mundo energético estaban firmemente establecidos, pero durante el siglo XX todos los componentes del sistema siguieron evolucionando, empujados por un crecimiento muy rápido y mejoras cualitativas, principalmente el aumento de la eficiencia, la productividad, la fiabilidad, la seguridad y el impacto ambiental. Esta progresión fue interrumpida por la Primera Guerra Mundial y luego por la crisis económica de los años 1930. La Segunda Guerra Mundial aceleró el desarrollo de la energía nuclear y la introducción de las turbinas de gas (motores de reacción) y la propulsión de cohetes. La fase de crecimiento que vino después de 1945 en todas las industrias energéticas alcanzó un nuevo pico a principios de la década de 1970, de tal manera que posteriormente muchas técnicas energéticas se estancaron en tamaño y a menudo en rendimiento. Algunos ejemplos notables son la potencia de las

turbinas de vapor, el tonelaje de los grandes buques petroleros o la eficiencia de las líneas de CA de alta tensión.

Esta estabilización no tuvo tanto que ver con límites técnicos como con un coste económico y un impacto ambiental inaceptables. Otro factor importante fue la rápida subida del precio del petróleo durante las crisis del petróleo de 1973 y 1979, que tuvo un efecto amortiguador sobre el consumo de energía. Como resultado de todo ello, la eficiencia, la fiabilidad y un cierto respeto del medio ambiente se convirtieron en nuevos e importantes objetivos en ingeniería. Finalmente, los precios de la energía se estabilizaron y la economía estadounidense, que aún hoy es la mayor del mundo, experimentó otra década de fuerte expansión durante la década de 1990 al fortalecer cada vez más su relación con China.

Tras décadas de miseria maoísta, el país más poblado del mundo adoptó reformas políticas que cuadruplicaron su consumo de energía primaria per cápita entre 1980 y 2010: en 2009 China se convirtió en el mayor consumidor de energía del mundo (en 2015 estaba un 30% por delante de Estados Unidos). Su consumo de energía per cápita en 2015 (95 GJ) fue similar al de Francia a principios de la década de 1970, aunque el consumo industrial era muy dominante, mientras que el residencial seguía siendo inferior al de un país occidental en una etapa de desarrollo comparable. En 2015, la tasa de crecimiento de la economía y la demanda de energía en China se moderaron inevitablemente, pero hay miles de millones de personas en la India, el sudeste asiático y África que esperan repetir el éxito chino, y hay que tener en cuenta además que para el 2050 habrá dos mil millones de personas más en el mundo.

Que la demanda de energía seguirá aumentando es una obviedad, pero nadie puede prever cómo se satisfará esta demanda en un mundo plagado de desigualdades económicas y preocupaciones ecológicas. Aunque los pronósticos y escenarios abundan, uno de los rasgos más característicos de la historia de la energía es la incapacidad para prever el futuro (Smil, 2003). A continuación revisaré y resumiré las

principales tendencias que han determinado el crecimiento, la maduración y la transformación de la extracción, el procesamiento y la distribución de combustibles fósiles, los avances en la generación de electricidad térmica y renovable, y la composición y el rendimiento cambiantes de los motores primarios mecánicos. Pero primero debo señalar varios aspectos que la producción de combustibles fósiles, la generación de electricidad y la difusión de los motores primarios tienen en común.

La extracción de combustibles fósiles después de 1900 ha estado marcada por tres tendencias notables. En primer lugar, la expansión mundial de la minería de carbón y la producción de hidrocarburos multiplicó por 20 la extracción anual de carbono fósil entre 1900 y 2015: de 500 Mt en 1900 a 6,7 Gt un siglo más tarde y 9,7 Gt en 2015 (Olivier, 2014; Boden y Andrés, 2015; para expresar estos totales en términos de CO_2, multiplíquense por 3,67). Debido a la distribución desigual de los combustibles fósiles, el crecimiento de la extracción ha conducido inevitablemente al desarrollo de un comercio verdaderamente mundial de crudo fácilmente transportable y un aumento de las exportaciones de carbón y gas natural (tanto por oleoductos como en buques cisterna de gas natural licuado). Sin embargo, un examen más detenido revela especificidades y excepciones importantes, ya que el crecimiento mundial subsume trayectorias nacionales complejas, incluidas las que presentan una notable reducción de la producción o el cese completo de la extracción.

En segundo lugar, el principal catalizador de este crecimiento han sido los avances técnicos que han dado lugar a métodos de extracción, transporte y procesamiento más baratos y productivos, así como a una reducción de las tasas de contaminación específica (y en un caso notable incluso a una reducción en términos absolutos de las emisiones mundiales).

En tercer lugar, ha habido una clara transición hacia combustibles de mayor calidad, del carbón al petróleo y el gas natural, proceso que

ha dado pie a una descarbonización relativa (un aumento de la relación H:C) de la extracción mundial de combustibles fósiles, mientras que los niveles absolutos de emisiones atmosféricas de CO_2 han ido en aumento, salvo en contadas excepciones temporales. La relación H:C de la combustión de madera puede variar, pero no es superior a 0,5; la del carbón es de 1,0; la de la gasolina y el queroseno, de 1,8; y la del metano (componente dominante del gas natural), de 4,0.

Comparados en términos de contenido energético, los combustibles ricos en carbono (madera y carbón) suministraban el 94 % de la energía mundial en 1900, el 73% en 1950 y solo el 38% en 2000 (Smil, 2010a). En consecuencia, la intensidad de carbono (o intensidad de emisión) del suministro mundial de combustibles fósiles ha ido decreciendo: expresada en términos de carbono por unidad de suministro de energía primaria mundial, pasó de 28 kg C/GJ en 1900 a 25 en 1950 y 19 en 2000 (un 30% en total). Posteriormente, como resultado del rápido aumento de la producción de carbón de China, aumentó un poco durante la primera década del siglo XXI (gráfico 5.12). Sin embargo, las emisiones mundiales totales de CO_2 procedentes de la quema de combustibles fósiles pasaron de solo 534 Mt C en 1900 a 1,63 Gt en 1950, 6,77 Gt en 2000 y 9,14 Gt C en 2010 (Boden, Andres y Marland, 2016).

La generación de electricidad ha combinado las mejoras técnicas con la implantación territorial a gran escala, estando este último proceso sorprendentemente retrasado incluso en regiones de Estados Unidos y, por supuesto, todavía lejos de completarse en muchos países pobres. El proceso comenzó con la creación de pequeñas redes aisladas y ha avanzado hasta crearse gigantes redes eléctricas interconectadas: en Europa cubren todo el continente, Rusia dispone de una extensa red, desde 1990 China ha construido muchas nuevas interconexiones de larga distancia y en el seno de las economías desarrolladas solo Estados Unidos y Canadá no disponen de una red nacional integrada. La última transformación que ha afectado a la

industria es la instalación de turbinas eólicas, paneles fotovoltaicos y centrales térmicas de energía solar: a diferencia de la hidroelectricidad (la forma tradicional de generación de energía renovable), estas nuevas energías renovables suelen ser objeto de una fuerte promoción y grandes subvenciones, y, de hecho, en algunos casos su capacidad instalada ha aumentado rápidamente, pero su carácter inherentemente intermitente y su modesto factor de planta o capacidad plantea problemas no triviales a la hora de integrarlas en las redes existentes.

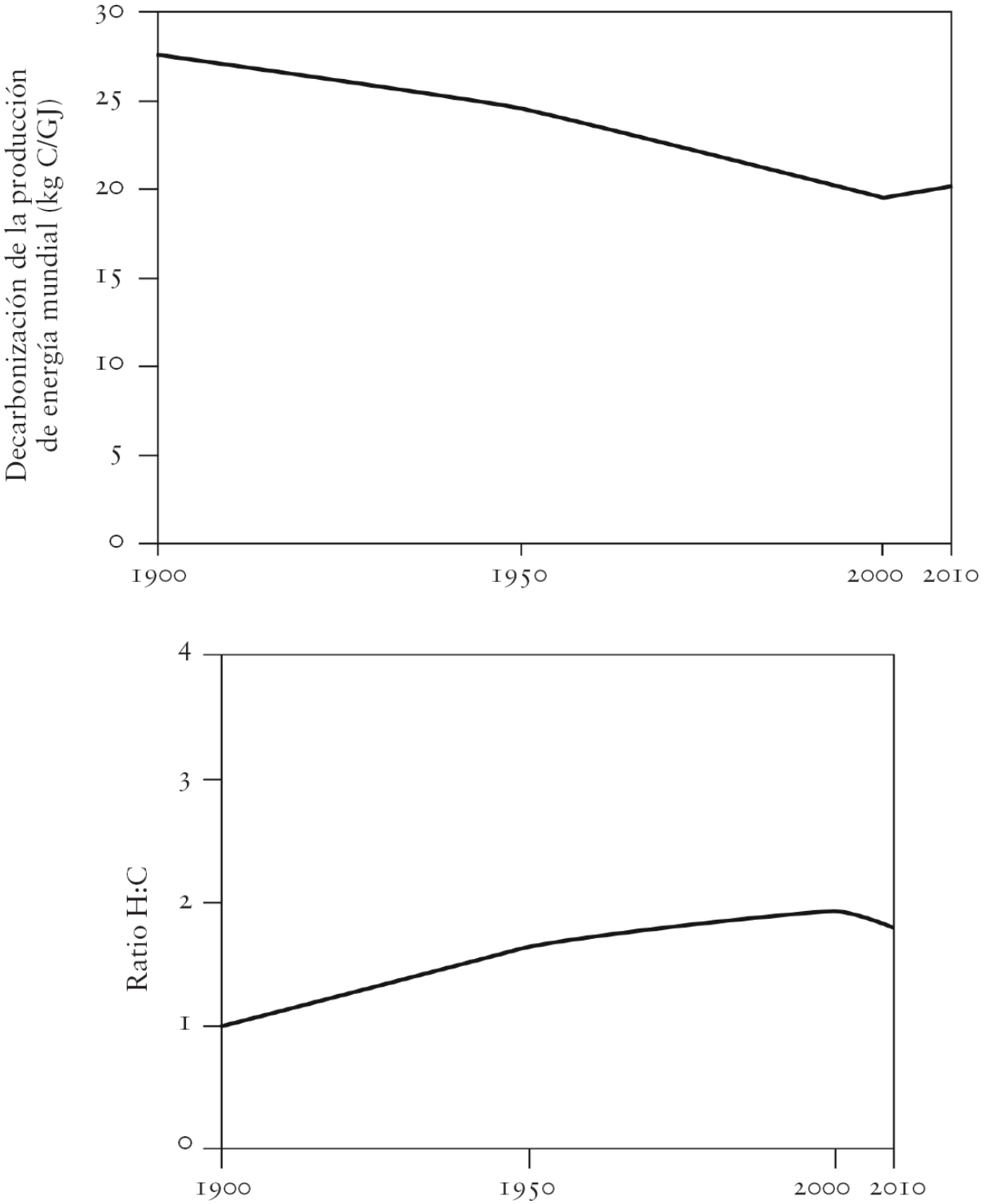


Figura 5.12 Descarbonización del suministro mundial de energía primaria, 1900-2010. Creado a partir de Smil (2014b).

Tipos de carbón

Las dos tendencias universales en la producción de carbón han sido la creciente mecanización de la extracción subterránea y el aumento de la proporción de la minería de superficie. La productividad estadounidense —la más alta del mundo— pasó de menos de 4 t de carbón por minero y turno en 1900 a 5 t por trabajador y hora, con tasas específicas situadas entre 2-3 t/h en las minas subterráneas de los Apalaches y 27 t/h en las minas de superficie de la cuenca del río Powder en Montana y Wyoming (USEIA, 2016a). La extracción superficial de gruesas vetas de lignito en Australia y Alemania también es muy productiva. El carbón de este tipo de mina de gran tamaño se quema con cada vez mayor frecuencia en grandes centrales adyacentes a la mina. Su transporte de largo recorrido se hace con trenes especiales, formados por hasta más de 100 vagones tolva ligeros, de gran tamaño y permanentemente acoplados, tirados por potentes locomotoras (Khaira, 2009).

El consumo de carbón ha estado marcado por dos hechos relevantes a medida que la contracción de sus mercados tradicionales (industrial, doméstico y de transporte) ha sido compensada con creces por las ganancias resultantes de la generación de electricidad a partir del carbón (y en menor medida por el aumento de la producción de coque metalúrgico y el uso del carbón como materia prima para síntesis químicas). El carbón que se quemaba en los hogares para calentar y cocinar se ha visto ampliamente desplazado por alternativas más limpias y eficientes, principalmente el gas natural y la electricidad. El carbón siguió siendo el principal combustible para el transporte durante la primera mitad del siglo XX, pero la conversión de locomotoras y buques a motores diésel (iniciadas respectivamente durante la primera y la tercera década del siglo XX) no hizo más que acelerar tras la Segunda Guerra Mundial, y todos los nuevos trenes rápidos (primero el Shinkansen japonés en 1964, después el TGV francés en 1978 y más adelante otras versiones europeas y asiáticas) han sido y son alimentados por motores eléctricos.

Durante la década de 1880, la combustión de carbón hizo posible la generación térmica de electricidad en todos los países con minería de carbón. Esta dependencia no hizo más que crecer a medida que se construyeron grandes centrales eléctricas después de la Segunda Guerra Mundial, cuando la creciente proporción de extracción en superficie hizo que el carbón fuera todavía más asequible. Durante la década de 1950 la combustión de carbón proporcionó la mayor parte de la generación de electricidad en Estados Unidos, Reino Unido, Alemania, Rusia y Japón. El fueloil adquirió importancia durante los años 1960, pero la mayoría de países dejaron de utilizarlo para generar electricidad después de que la OPEP aumentara los precios del petróleo durante la década de 1970, y aún hoy la dependencia respecto al carbón sigue siendo elevada en China, India y Estados Unidos. El uso específico del coque metalúrgico (kg de coque/kg de metal caliente) ha ido disminuyendo durante décadas, pero la expansión mundial de la fundición de arrabio —de 30 Mt en 1900 a 1,2 Gt en 2015— hizo que la producción de carbón coquizable fuera de 1,2 Gt (Smil, 2016).

La historia del carbón en cada país ha sido a veces muy predecible y otras veces sorprendente, como el final de la minería de carbón en el primer país que lo extrajo, Reino Unido (figura 5.13). La producción británica alcanzó un pico de 292 Mt en 1913. El carbón no solo alimentó la industria británica, sino también la expansión de su imperio colonial, naval y comercial en el siglo XIX. En 1947, cuando el gobierno laborista nacionalizó la industria y creó la Junta Nacional del Carbón (National Coal Board), la producción todavía era de casi 200 Mt (Smil 2010a). El pico de la posguerra se produjo en 1952 (y de nuevo en 1957): 228 Mt; pero entonces la creciente importación de petróleo y, después de 1970, la disponibilidad de petróleo y gas natural del mar del Norte redujeron a la mitad el consumo del país en 1980.

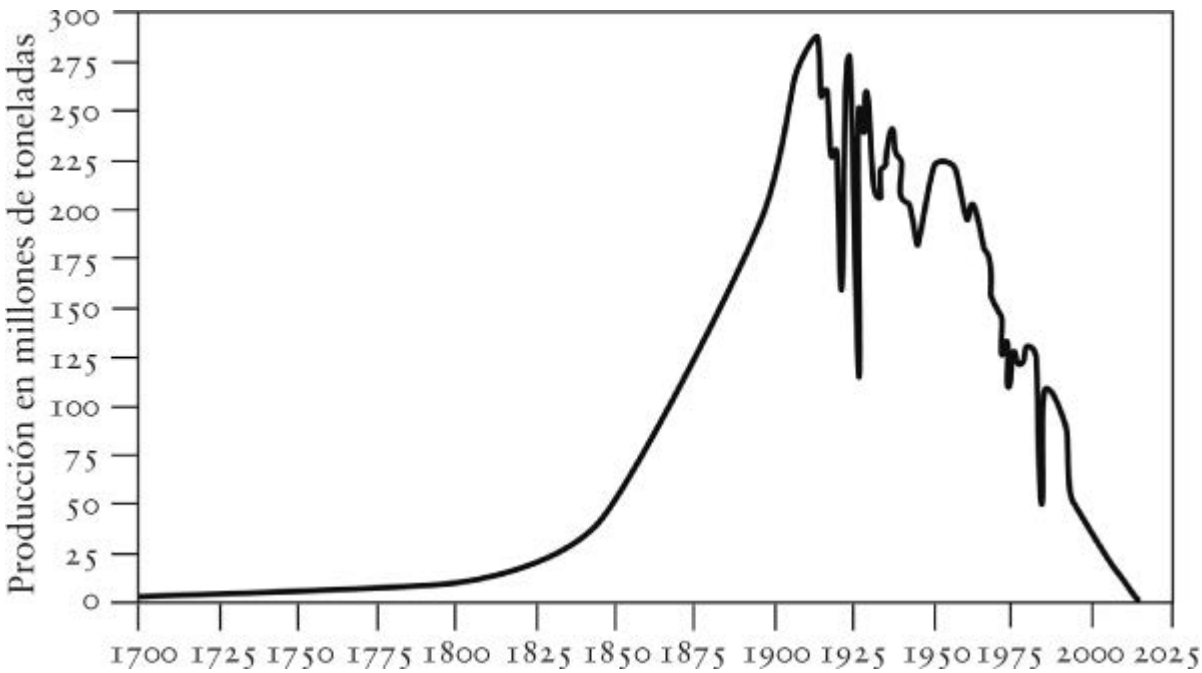


Figura 5.13 Producción británica de carbón, 1700-2015. Realizado a partir de datos de Nef (1932) y del Departamento de Energía y Cambio Climático (2015).

Durante la larga huelga de mineros de 1984 la producción total cayó a 51 Mt, luego se recuperó brevemente y finalmente reanudó su caída, que siguió después de la reprivatización en 1994 (Smil, 2010a). En 2000, la producción fue solo de 31 Mt, y en julio de 2015 UK Coal Holdings anunció el cierre inmediato de su mina Thoresby, así como el fin de las operaciones de la última mina británica, Kellingley, en diciembre de 2015 (Jamasmie, 2015). Después de 400 años, la industria que hizo a Reino Unido económica y estratégicamente grande (y cuyo pico de empleo durante la década de 1920 fue de 1,2 millones de trabajadores, el 7% de la fuerza laboral total) ahora se limita a unos pocos museos y visitas guiadas subterráneas (Museo Nacional de la Minería del Carbón, 2015).

La extracción de carbón estadounidense alcanzó los 508 Mt en 1950 y un pico de 1,02 Gt en 2001. Durante ambas fechas desaparecieron el mercado del transporte y casi todos los mercados domésticos, y además la producción de carbón coquizable también disminuyó, pero las exportaciones fueron en aumento. Más del 90%

de ese carbón se quema ahora en centrales térmicas: en 1950 Estados Unidos generó el 46% de su electricidad con carbón; la proporción alcanzó el 52% en 1990 y se mantuvo igual de alta durante más de una década; en 2010 todavía se situaba en el 45%, pero en 2015, debido a la clausura de antiguas centrales de carbón y la abundancia de gas natural barato, había caído al 33% (USEIA, 2015a). La producción de carbón de Estados Unidos fue superada por la china en 1985. De hecho, el carbón ha sido con mucho la fuente de energía más importante para el extraordinario crecimiento económico de China durante las últimas décadas (USEIA, 2015b; recuadro 5.12).

La URSS produjo más carbón que Estados Unidos hasta 1983, pero tras el colapso de la Unión la extracción de carbón disminuyó a medida que crecían las de gas natural y petróleo. La India es ahora el tercer productor mundial (en 2014 representaba solo una sexta parte de la producción china), pero su carbón es de calidad muy inferior a la de los yacimientos chinos y estadounidenses y la productividad de su extracción sigue siendo pésima. Indonesia y Australia —ambos grandes exportadores— completan los cinco primeros puestos, seguidos de Rusia, Sudáfrica, Alemania, Polonia y Kazajstán, mientras que algunos antiguos grandes productores de carbón, incluidos Alemania y Reino Unido, se han convertido en importantes importadores de carbón.

Como el carbón genera más CO_2 por unidad de energía liberada que cualquier otro combustible fósil —las tasas típicas son de más de 30 kg C/GJ para el carbón, 20 kg C/GJ para los hidrocarburos líquidos y menos de 15 kg C/GJ para el gas natural—, su futuro en un mundo muy preocupado por el calentamiento global es incierto. La gran dependencia respecto al carbón para la generación de electricidad en China, la India y al menos una docena de países más impide su abandono rápido, pero a largo plazo es posible que el carbón sea el primer recurso energético importante cuya extracción sea limitada —existiendo todavía abundantes reservas disponibles— por motivos medioambientales.

Hidrocarburos

A principios del siglo XX el petróleo solo se producía en cantidades significativas en un puñado de países y representaba el 3% de todo el consumo de energía fósil; en 1950, esa proporción era del 21%; en 1964 el contenido energético del petróleo superó al del carbón; y en 1972 alcanzó su pico histórico: 46% de todos los combustibles fósiles. El lugar común según el cual el siglo XX estuvo dominado por el petróleo y el XIX por el carbón es erróneo: antes de 1900, el combustible más importante era la madera; y en su conjunto el siglo XX estuvo dominado por el carbón (Smil, 2010a). De acuerdo con mis propios cálculos, el carbón está un 15% por delante del petróleo (5,2 YJ frente a 4 YJ), e incluso si se incluyen aplicaciones no energéticas del petróleo procesado (en lubricantes y materiales de pavimentación), el carbón seguiría estando ligeramente por delante de los hidrocarburos líquidos, o, en el mejor de los casos —debido a la incertidumbre inherente a la conversión de las masas extraídas en equivalentes energéticos comunes—, empataría con ellos.

RECUADRO 5.12

Producción de carbón en China

Cuando el Partido Comunista de China estableció un nuevo régimen político el 1 de octubre de 1949, alimentó su industrialización de corte estalinista con sus abundantes pero muy desigualmente distribuidas reservas de carbón. Desde entonces, la dependencia relativa del país respecto al carbón ha disminuido, aunque el consumo total no ha dejado de aumentar (Smil, 1976; Thomson, 2003; China Energy Group, 2014; Asociación Mundial del Carbón, 2015). La producción de carbón pasó de 32 Mt en 1949 a 130 Mt en 1957, y oficialmente se dijo que era de casi 400 Mt en 1960 durante el infame Gran Salto Adelante promovido por Mao Zedong para superar la producción de hierro, acero y otros recursos industriales importantes de Reino Unido en menos de 15 años (Huang, 1958). Tras el colapso del Salto, que causó la peor hambruna que la humanidad ha vivido jamás, un progreso más ordenado llevó la producción hasta más de 600 Mt en 1978, en el momento en que

comenzaban las reformas económicas estructurales de Deng Xiaoping, que habían de transformar China en el mayor exportador mundial de productos manufacturados y elevar el nivel de vida de sus 1.400 millones de habitantes.

Dos cosas que han permanecido estables hasta ahora son el firme control del Partido sobre el Estado y la dependencia de la economía china respecto al carbón. Como decíamos, la dependencia relativa ha bajado (de más del 90% en 1955 al 67% en 2010), igual que la proporción de electricidad generada a partir del carbón, pero sigue estando por encima del 60%, lo cual es mucho. Entre tanto, la producción total de carbón se multiplicó por más de cuatro entre 1980 (907 Mt) y 2013 (3,97 Gt), año en que representaba casi la mitad de toda la producción mundial. 2014 fue el primer año en que la extracción bajó (el 2,5%), y en 2015 hubo otro descenso del 3,2%, pero los totales reales siguen siendo inciertos: en septiembre de 2015 la Oficina Nacional de Estadística de China elevó sin explicación alguna los datos oficiales sobre la extracción anual de carbón entre 2000 y 2013. La producción de carbón ha sido una de las principales causas de muertes por accidente laboral en China y la mayor fuente de una contaminación atmosférica que está completamente desbocada, con niveles de partículas en suspensión (<2,5 μm) a menudo un orden de magnitud por encima del máximo deseable (Smil, 2013b).

Los combustibles líquidos derivados del petróleo son mejores que el carbón, y, mientras que, como acabamos de mostrar, a lo largo del siglo XX el mercado del carbón se redujo a solo dos grandes tipos de uso —la generación de electricidad y el coque—, el mercado de los hidrocarburos líquidos se expandió de manera constante tanto como sustituto de otras fuentes de energía como debido al surgimiento de nuevos sectores de gran consumo. Las principales sustituciones fueron el carbón por el fueloil y el gasóleo en el transporte marítimo (desde antes de la Primera Guerra Mundial y sobre todo durante la década de 1920) y luego el transporte ferroviario (a partir de la década de 1920), el carbón por el fueloil (y luego el gas natural) en la calefacción industrial, corporativa y doméstica, y el carbón por los hidrocarburos líquidos y gaseosos como materia prima para la industria petroquímica (después de la Segunda Guerra Mundial).

El primer nuevo gran mercado surgió con la fabricación de automóviles asequibles, desde antes de la Primera Guerra mundial con el Modelo T de Ford, y sobre todo con el rápido aumento de la adquisición de automóviles después de la Segunda Guerra Mundial. El segundo comenzó con la introducción de motores de reacción en la aviación comercial durante la década de 1950, una innovación que transformó el volar de una experiencia muy costosa y poco frecuente en una enorme industria global (Smil, 2010b). La industria petrolera pudo satisfacer esta demanda creciente gracias a numerosos avances técnicos en todos los ámbitos de su funcionamiento, e incluso una lista muy corta de las mejoras clave del siglo XX en este sector requiere hablar de más de una docena de aspectos (Smil, 2008a).

La lista debe comenzar con los avances en la prospección geofísica, que incluyen la idea de las mediciones de la conductividad eléctrica (1912), el registro de pozos de resistividad eléctrica (1927) para identificar estructuras subterráneas con presencia de hidrocarburos y potencial espontáneo (1931) y el registro de inducción (1949), introducidos por Conrad Schlumberger (1878-1936) y sus parientes y posteriormente perfeccionados por la empresa homónima y otras empresas exploradoras de gas y petróleo (Smil, 2006). Los avances en la extracción incluyen primero la adopción universal de la perforación rotatoria (utilizada por primera vez en el pozo Spindletop, en Beaumont, Texas, en 1901; véase figura 5.7), luego la introducción de la barrena de conos giratorios en 1909 por Howard Hughes (1905-1976), la invención de la broca tricónica en 1933 y mejoras en la supervisión y regulación del flujo de petróleo y la prevención de las explosiones de los pozos. Por otra parte, el uso creciente de métodos de recuperación secundarios y terciarios (que utilizan agua y otros líquidos o gases para forzar la llegada de más petróleo a la superficie) ha prolongado la vida útil de los pozos y aumentado su productividad, tradicionalmente muy baja (antes solía recuperarse solo el 30% del petróleo disponible).

Una parte cada vez más importante de la producción de petróleo procede de pozos marinos. La perforación desde muelles cercanos a la costa ya era común en California en 1900, pero el primer pozo situado en alta mar fue perforado en 1947 cerca de Louisiana. Las plataformas marinas (en su mayoría diseños semisumergibles) trabajan en aguas con más de 2.000 m de profundidad. Las plataformas de producción instaladas en los grandes campos *offshore* son de las estructuras más grandes y pesadas jamás construidas. Y el avance más reciente en la producción es la creciente extracción de fuentes no convencionales de petróleo, incluyendo petróleo pesado (en muchos lugares del mundo), petróleo de arenas bituminosas (Alberta, Venezuela) y la extracción por fractura hidráulica para producir petróleo de esquisto. Esta técnica ha tenido tanto éxito que Estados Unidos, que la desarrolló primero, se convirtió de nuevo en el mayor productor mundial de petróleo y otros líquidos de petróleo en 2015, aunque, si se considera solo el petróleo crudo, Arabia Saudita todavía estaba un poco por delante (568,5 Mt frente a 567,2 Mt).

En el ámbito del transporte, los oleoductos (tuberías de acero de gran diámetro) son capaces de cruzar continentes. Son el método más compacto, fiable, limpio y seguro de transporte a granel sobre tierra. Los oleoductos estadounidenses que transportan petróleo desde la costa del golfo hasta la costa este, construidos durante la Segunda Guerra Mundial, fueron superados en longitud en la década de 1970 por el sistema más largo del mundo, creado para trasladar petróleo desde Siberia occidental hasta Europa. El oleoducto Ust-Balik-Kurgán-Almétievsk, de 120 cm de diámetro y 2.120 km de longitud, transporta 90 Mt/año de petróleo desde el campo petrolero de Samotlor hasta la Rusia europea. Después, 2.500 km de líneas ramificadas de gran diámetro trasladan ese petróleo a los mercados europeos, hasta Alemania e Italia. Después de la Segunda Guerra Mundial, la demanda de petróleo importando en Europa y Japón dio lugar a un rápido crecimiento del tamaño de los petroleros (Ratcliffe, 1985). Esto convirtió el petróleo en un producto básico asequible a

nivel mundial: la distancia entre su origen y el usuario final se ha convertido en una consideración económica poco importante, y la venta intercontinental anual de petróleo supera las 2 Gt (recuadro 5.13).

La innovación más importante en la refinación fue el craqueo catalítico. Hasta 1936, la norma fue el craqueo térmico. Ese mismo año, Eugène Houdry (1892-1962) comenzó a producir gasolina de alto octanaje —el principal combustible para automóviles en la actualidad— en la primera unidad de craqueo catalítico del mundo, situada en la refinería de Sun Oil, en Pensilvania, que ha permitido producir cada vez más hidrocarburos ligeros y, por tanto, más valiosos (como la gasolina y el queroseno) a partir de compuestos pesados e intermedios. Poco después pudo utilizarse un nuevo catalizador de lecho móvil sin interrumpir la producción, e incluso obtener gasolina de alto octanaje con un mejor rendimiento gracias a un catalizador aéreo pulverizado (Smil, 2006). Durante la década de 1950, el craqueo catalítico de fluidos convivió con el hidrocraqueo a presiones relativamente altas, y las dos técnicas siguen siendo los pilares de la refinación moderna de petróleo. La refinación también se ha beneficiado de la desulfuración de los combustibles líquidos, que ha comportado que incluso el uso de combustibles proverbialmente contaminantes como el gasóleo sea aceptado en automóviles de bajas emisiones (CDFA, 2015).

RECUADRO 5.13

Petroleros gigantes

El primer petrolero del mundo, el Glückauf alemán, de construcción británica, botado en 1886, solo podía cargar 2.300 t brutas (Tyne Built Ships, 2015). El progreso llevó el tamaño máximo a 20.000 toneladas de peso muerto (TPM) a principios de la década de 1920. Durante la guerra, los buques cisterna estadounidenses más utilizados (los T-2) tenían una capacidad de 16.500 TPM. En realidad, el rápido aumento de la capacidad comenzó a finales de la década

de 1950, al empezar la expansión del comercio mundial de petróleo (importaciones en Europa y Japón). El Universe Apollo fue el primer buque de 100.000 TPM, en 1959; en 1966 el Idemitsu Maru alcanzó las 210.000 TPM, y cuando la OPEP quintuplicó sus precios en 1973, el buque más grande del mundo podía transportar más de 300.000 t (Kumar, 2004).

La construcción de un buque capaz de transportar un millón de toneladas de petróleo es posible desde hace tiempo, pero también poco práctica por muchas razones diferentes: su enorme calado restringiría las rutas y puertos de escala (no podría pasar por el canal de Suez o Panamá), necesitaría mucha distancia para detenerse, sería muy caro de asegurar y podría causar catastróficos vertidos de petróleo, como los del Amoco Cadiz (Francia, 1978), el Castillo de Bellver (Sudáfrica, 1983) y el Exxon Valdez (Alaska, 1989). El mayor petrolero del mundo, el Seawise Giant, construido en 1979, tenía 459 m de longitud y una capacidad de 564.763 TPM; fue alcanzado durante la guerra entre Irán e Iraq en 1988, relanzado a la mar con el nombre de Jahre Viking (1991-2004), rebautizado como Knock Nevis y utilizado como unidad flotante de almacenamiento y descarga frente a la costa de Qatar (2004-2009), luego vendido a un desguazador de barcos cisterna en India y finalmente rebautizado con el nombre de Mont para su viaje final a Alang, en Guyarat (Konrad, 2010).

Todo esto ha conllevado cuatro consecuencias notables. En primer lugar, la producción mundial de petróleo se multiplicó por 200 durante el siglo XX; en 2015 era un 20% mayor que en 2000 (4,3 Gt), y desde 1964, año en que superó al carbón en contenido energético, ha sido el combustible más utilizado del mundo. En segundo lugar, el petróleo se extrae ahora en todos los continentes y océanos, excepto en los mares del Ártico y la Antártida, en campos de hasta 7 km de profundidad en tierra y 2,1 km en el mar (profundidad a la que se sitúa el campo de Tupí, en el océano Atlántico brasileño, que luego sigue 5 km por debajo del fondo del océano). En tercer lugar, el petróleo es el producto básico más valioso del mundo: con un precio de 93 dólares por barril West Texas Intermediate, en 2010 su producción anual representaba 3 billones de dólares; en 2015, cuando

el precio bajó hasta 49 dólares/barril de media, era de 1,6 billones de dólares (BP, 2016).

Por último, aunque la extracción de petróleo está ampliamente distribuida geográficamente, hay que subrayar que los mayores campos petrolíferos del mundo fueron descubiertos en tierra firme en la región del golfo Pérsico entre 1927 (Kirkuk en Iraq) y 1958 (Ahvaz en Irán). Ghawar, el mayor campo petrolífero del mundo, situado en la provincia oriental de Arabia Saudí, funciona desde 1951, y el segundo más grande, Burqan, en Kuwait, lo hace desde 1946 (Smil, 2015b; figura 5.14). Es imposible cambiar esta realidad fundamental: en 2015, casi la mitad de las reservas conocidas de petróleo convencional (líquido) se hallaban en Oriente Medio, región que por desgracia también es una destacadísima fuente de complejos conflictos e inestabilidad política (BP, 2016).

El gas natural siguió siendo una fuente de energía minoritaria durante mucho tiempo: en 1900 solo representaba el 1% de toda la energía fósil y en 1950, alrededor del 10%. Con el tiempo, tres grandes factores llevaron su cuota mundial mucho más arriba, hasta el 29% en 2000, de tal manera que a lo largo del siglo XX su consumo mundial acabó multiplicándose por 375 (Smil, 2010a). El uso de gas natural como materia prima y combustible para la síntesis de amoníaco —el fertilizante nitrogenado más importante del mundo, utilizado principalmente como materia prima para producir urea sólida— y la producción de plásticos constituyen nuevos mercados que, aun siendo pequeños, son muy importantes (Smil, 2001; IFIA, 2015).

Figura 5.14 Yacimientos petrolíferos supergigantes y gigantes en Oriente Medio. En 2015, la región contenía al menos el 45 % de las reservas mundiales de petróleo (BP, 2016).

El mayor nuevo mercado mundial se ha desarrollado como respuesta a los altos niveles de contaminación atmosférica urbana experimentados en la mayoría de las ciudades occidentales durante el periodo de rápida industrialización posterior a la Segunda Guerra Mundial: la sustitución del carbón y el fueloil por gas natural para la calefacción (y la cocina) industrial, corporativa y doméstica terminó con la emisión de partículas en suspensión y casi eliminó la generación de SO_2 (es fácil eliminar los componentes sulfúricos del gas antes de la combustión). Las ciudades de los países de América Latina y Asia en proceso de rápida modernización han seguido esta tendencia, aunque muchas de ellas, como Tokio y otras urbes japonesas, Seúl, Guangzhou, Shanghái y Mumbai tuvieron que hacerlo con gas natural licuado (GNL), importado y caro. La última tendencia que ha

impulsado el uso del gas natural ha sido su empleo para la generación de electricidad con turbinas de gas y, aún más eficiente, con turbinas de gas de ciclo combinado (véase sección siguiente). La fracturación hidráulica posterior a 2005 no solo ha detenido el declive de la extracción de gas natural en Estados Unidos, sino que, como ya hemos dicho también, ha devuelto al país el título de mayor productor mundial.

El transporte de gas natural por gasoducto es intrínsecamente más caro que el transporte de cualquier hidrocarburo líquido, de tal manera que los gasoductos de larga distancia solo fueron viables con la introducción de tubos de acero de hasta 2,4 m de diámetro y eficientes compresores de turbina de gas (Smil, 2015a). Estados Unidos y Canadá disponen de sistemas de gasoductos integrados desde la década de 1960, aunque la red internacional más amplia se desarrolló en Europa a partir del final de esa misma década. Los gasoductos más largos —uno de 4.451 km entre Urengói y la estación de Úzhgorod, en la frontera entre Ucrania y Eslovaquia, y otro de 4.190 km entre Yamal y Alemania— llevan el gas de Siberia a Europa central y occidental, donde las citadas líneas conectan con las redes de los Países Bajos, el mar del Norte y África septentrional.

El envío de GNL en los años 1960 era muy caro, de tal manera que durante las tres décadas siguientes solo existió un comercio limitado principalmente en países de Asia oriental sin recursos propios (Japón, Taiwán, Corea del Sur). El descubrimiento de nuevos yacimientos de gas y la introducción de buques más grandes de transporte de GNL trajeron consigo una expansión relativamente rápida del comercio: en 2015, un tercio del gas se exportaba en buques cisterna (BP, 2016). Japón sigue siendo el primer importador mundial, aunque pronto será superado por China, mientras que Estados Unidos, que tradicionalmente ha sido un gran importador por gasoducto desde Canadá, está desarrollando muchas nuevas instalaciones de GNL con la esperanza de convertirse en un importante exportador a nivel mundial y tal vez incluso competir con

Qatar, que dispone de los mayores yacimientos del mundo en el golfo Pérsico (Smil, 2015a).

Electricidad

El avance de la electrificación ha requerido un crecimiento exponencial de la capacidad de todos los componentes del sistema. Las primeras calderas eran relativamente pequeñas y se alimentaban con carbón en trozos. A partir de la década de 1920, fueron sustituidas por unidades de varios pisos que quemaban combustible pulverizado en una cámara de combustión y calentaban el agua que circulaba por las tuberías de acero que revestían las paredes de la caldera. El fueloil y el gas natural también se convirtieron en combustibles habituales en las grandes centrales de generación de electricidad, si bien el uso del primero se interrumpió tras la segunda subida de los precios del petróleo por parte de la OPEP, en 1979-1980 (excepto en Rusia y Arabia Saudí), y el gas natural se quema ahora principalmente en turbinas de gas no solo en países con mucho gas, sino también en los que tienen que importar GNL, aunque es muy caro. En Estados Unidos, la electricidad generada por gas pasó del 12% del total en 1990 al 33% en 2014. En Japón, la proporción era de un 28% en 2010 y un 44% en 2012, tras el cierre de las centrales nucleares a raíz del desastre de Fukushima (The Shift Project, 2015).

Las grandes calderas suministran vapor a turbogeneradores cuya potencia máxima es tres órdenes de magnitud superior a la que tenían en 1900 (la más grande, situada en la central nuclear de Flamanville, en Francia, tiene una potencia de 1,75 GW), y su mayor presión y temperatura de funcionamiento ha llevado la eficiencia máxima de menos del 10% en 1900 a algo más del 40% (figura 5.15). Es posible lograr una eficiencia aún mayor, del orden del 60%, combinando turbinas de gas (hoy en día las más grandes tienen una potencia superior a 400 MW) y turbinas de vapor (que utilizan el gas caliente que sale de la turbina de gas para producir vapor). Lógicamente, las centrales llamadas de ciclo combinado se han convertido en una

fuente muy apreciada de generación de electricidad, especialmente para cubrir los picos de mayor demanda (Smil, 2015b). Los grandes motores diésel, por su parte, siguen siendo la opción más económica para generar electricidad en regiones aisladas, así como para proporcionar un mecanismo de suministro ininterrumpido de energía de reserva en caso de emergencia.

La expansión de los servicios públicos (*utilities*) de los sistemas urbanos a los nacionales comenzó lentamente después de la Primera Guerra Mundial y se aceleró después de la Segunda Guerra Mundial y ha incluido los siguientes componentes universales (Hughes, 1983): la búsqueda de economías de escala; la construcción de centrales más grandes en (o cerca de) las grandes ciudades; la construcción de líneas de alta tensión para transportar electricidad desde centrales hidroeléctricas remotas; la promoción del consumo de masas; y la interconexión de sistemas más pequeños para mejorar la seguridad del suministro y reducir la capacidad instalada y de reserva. Después de 1950, la preocupación por la contaminación atmosférica condujo a la creación de grandes centrales más cercanas a las fuentes de combustible. Este cambio aumentó aún más la dependencia respecto a las líneas de alta tensión.

En consecuencia, desde la década de 1890 la potencia de los transformadores más grandes se ha multiplicado por 500 y el voltaje máximo de transmisión, por más de 100. Las redes de transmisión comenzaron estando hechas de postes de madera e hilos de cobre sólido. Con el tiempo, aparecieron las torres de acero y los cables de aluminio reforzados con acero y cargados con hasta 765 kV, y actualmente el voltaje más alto del mundo de CC es ± 800 kV y transporta 6,4 GW entre la central hidroeléctrica de Xiangjiaba y Shanghái. El servicio doméstico pasó de un puñado de enchufes a sistemas de más de 50 interruptores y tomas de corriente por vivienda. El aumento de la capacidad y la generación de electricidad ha ido de la mano de una mayor fiabilidad del servicio, una consideración

especialmente importante en un mundo plagado de dispositivos y controles electrónicos (recuadro 5.14)

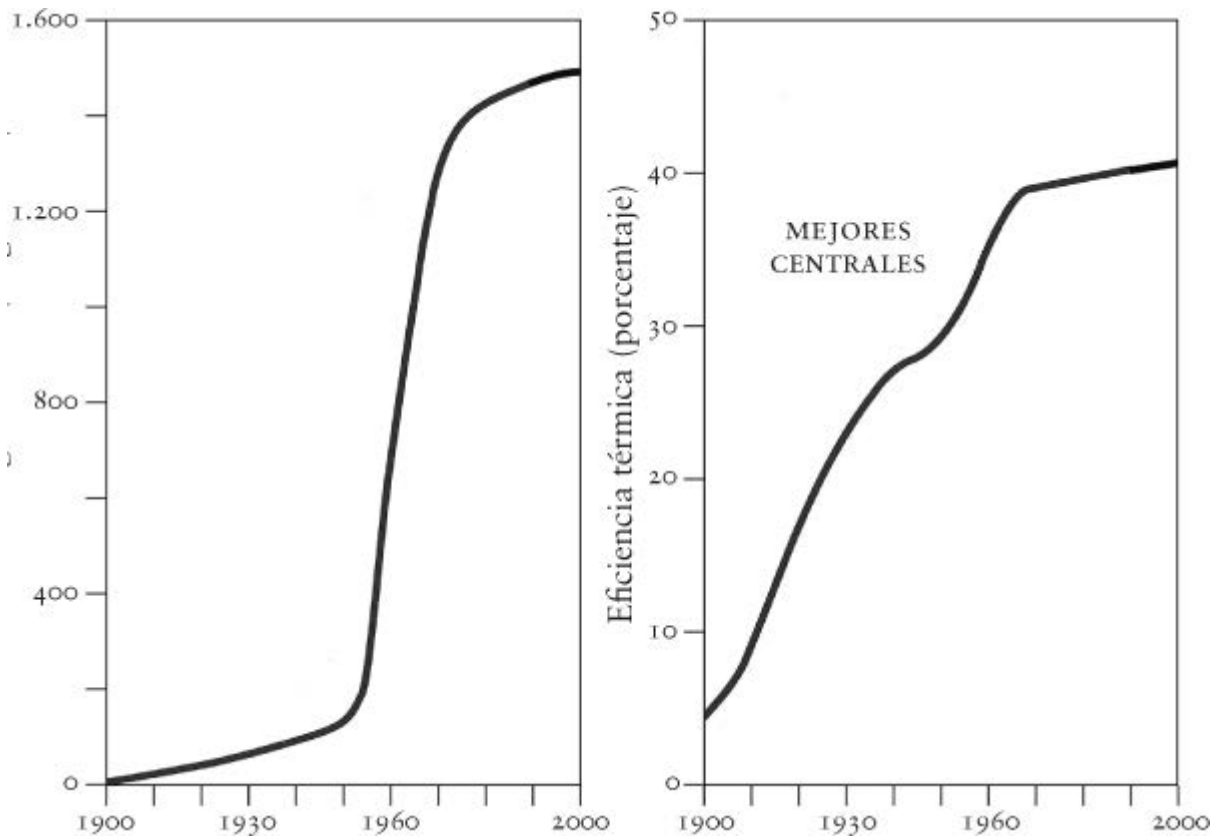


Figura 5.15 Capacidad máxima de turbogeneradores de vapor y eficiencia de las mejores centrales térmicas del mundo, 1900-2000. Realizado con datos de Dalby (1920), Termuehlen (2001) y Smil (2008a).

El uso de la fisión nuclear como vía importante para generar vapor y después electricidad térmica se aceleró con la Segunda Guerra Mundial. La primera demostración, realizada por Lise Meitner y Otto Frisch, tuvo lugar en diciembre de 1938, y la primera reacción en cadena sostenida, el 2 de diciembre de 1942 en la Universidad de Chicago. La primera bomba nuclear se testó en julio de 1945 y en agosto de ese mismo año se lanzaron dos bombas con tres días de diferencia (Kesaris, 1977; Atkins, 2000). Dejando de lado el desarrollo continuo de armas nucleares más potentes (véase la sección sobre armas y guerra en el siguiente capítulo), el primer gran programa

nuclear estadounidense de la posguerra consistió en desarrollar reactores nucleares para la propulsión de submarinos: el Nautilus fue lanzado en enero de 1955 y casi inmediatamente después se le pidió a Hyman Rickover (1900-1986), director del programa de submarinos nucleares, que reconfigurara el reactor para generar electricidad comercial (Polmar y Allen, 1982). La primera central nuclear estadounidense, Shippingport, en Pensilvania, comenzó a funcionar en diciembre de 1957, más de un año después de la puesta en marcha de la central de Calder Hall, Reino Unido, en octubre de 1956.

RECUADRO 5.14

Fiabilidad del suministro eléctrico

La fiabilidad del suministro de electricidad se expresa a menudo en términos de nueves, el porcentaje de tiempo en un año estándar de 365 días que una red en particular funciona correctamente y es capaz de abastecer la demanda. Un sistema con cuatro nueves, con electricidad disponible el 99,99% del tiempo, puede parecer altamente fiable, pero en realidad no funcionaría durante casi 53 min/año. Cinco nueves reducirían la interrupción a 5 min/año. El objetivo de la industria ha sido lograr una fiabilidad del 99,9999% (seis nueves), reduciendo las interrupciones a solo 32 s/año. En Estados Unidos, el rendimiento actual es de 99,98%, con cortes causados no solo por la meteorología (tornados, huracanes, tormentas de nieve, frío extremo), sino también por el vandalismo o interrupciones en el suministro de combustible (Wirfs-Brock, 2014; North American Electric Reliability Corporation, 2015).

La comunicación, los controles y el almacenamiento de información electrónicos son fundamentales para cualquier sector de la economía moderna: desde el seguimiento de la entrega de alimentos en camión hasta la producción automatizada de microchips, pasando por la negociación de activos financieros o el control del tráfico aéreo. La única forma de garantizar un servicio ininterrumpido es instalar sistemas de emergencia (baterías y generadores capaces de responder rápidamente). Incluso cortes breves en el suministro de electricidad pueden ser muy costosos, alcanzando los 10 millones de dólares/hora en el caso de algunos servicios y operaciones industriales. Entre 2003 y 2011, en Estados Unidos las pérdidas oscilaron entre 18.000 y 75.000 millones de dólares (Oficina Ejecutiva del Presidente, 2013). Además, las redes

eléctricas son objetivos fundamentales para los ciberataques de grupos terroristas o gobiernos rivales.

Retrospectivamente, no era el mejor diseño posible de reactor, pero se convirtió en el modelo dominante en todo el mundo. Su adopción temprana hizo que, cuando otros reactores estuvieron listos para competir, ya estuviera afianzado (Cowan, 1990). En 2015, 277 de los 437 reactores nucleares en funcionamiento en el mundo eran reactores de agua a presión, la mayoría de ellos en Estados Unidos y Francia. Echando la vista atrás, después de casi medio siglo de generación nuclear civil, pienso que la electricidad nuclear es un fracaso exitoso (Smil, 2003). Los desarrollos recientes refuerzan este veredicto. Es un éxito porque en 2015 suministró el 10,7% de la electricidad mundial (y antes del reciente aumento de la construcción de centrales eléctricas de carbón en China la proporción era del 17%). En muchos países el porcentaje es más alto, como el 20% de Estados Unidos, el 30% de Corea del Sur (y Japón antes de 2011) o el 77% en Francia. Y es un fracaso porque su enorme potencial inicial (durante la década de 1970 se esperaba que a finales de siglo la energía nuclear fuera el modo dominante de generación de electricidad a nivel mundial) está muy lejos de cumplirse.

Las deficiencias técnicas de los diseños predominantes, el elevado coste y la demora crónica de la construcción de centrales, el problema no resuelto de la eliminación de los residuos radiactivos en el largo plazo y la preocupación por la seguridad de las operaciones (que incluso después de 60 años de historia incluye afirmaciones sumamente exageradas sobre las posibles repercusiones de las centrales en la salud) han impedido un crecimiento más rápido de la industria nuclear. La preocupación por la seguridad y la percepción pública de riesgo intolerable se vieron reforzadas por el accidente de Three Mile Island en 1979, el desastre de Chernóbyl en 1986 y la

explosión de tres reactores a raíz de un gran terremoto y un tsunami en Fukushima en 2011 (Elliott, 2013).

Como resultado, algunos países se han negado a permitir la construcción de centrales nucleares (Austria, Italia), otros tienen planes para su cierre completo en un futuro próximo (Alemania, Suecia) y la mayoría de países con centrales en funcionamiento, o bien han dejado de añadir capacidad hace décadas (Canadá, Reino Unido), o bien han construido pocas centrales nuevas (muchas menos de las necesarias para siquiera reemplazar las más antiguas). Estados Unidos y Japón son los dos países más importantes de este último grupo: en 2015 había 437 reactores en funcionamiento en todo el mundo; de los 67 reactores en construcción, 25 estaban en China, nueve en Rusia y seis en la India (WNA, 2015b). Básicamente, Occidente ha renunciado a esta forma limpia y con cero emisiones de carbono de generación de electricidad.

Energías renovables

La dependencia creciente respecto a los combustibles fósiles ha hecho que los biocombustibles sean relativamente mucho menos importantes, pero, debido al rápido crecimiento de la población en áreas rurales de los países más pobres (donde no ha habido acceso a las fuentes de energía modernas o este ha sido muy limitado), el mundo consume ahora más leña y carbón vegetal que nunca. Según mis estimaciones, el consumo bruto de biocombustibles tradicionales alcanzó 45 EJ en 2000, el doble que en 1900 (Smil, 2010a), y durante los primeros 15 años del siglo XXI el total disminuyó solo marginalmente. Esto significa que en 2000 los biocombustibles suministraron el 12% de la energía primaria mundial y que en 2015 esa proporción disminuyó al 8% (mientras que en 1900 representaba el 50%).

Lamentablemente, ni siquiera este consumo, equivalente a 1 Gt de petróleo, ha sido suficiente: cientos de millones de personas de áreas rurales de países pobres de África, Asia y América Latina siguen

quemando biomasa, de tal manera que la demanda de leña y carbón vegetal ha sido una de las principales causas de deforestación en el África saheliana, Nepal, la India, el interior de China y gran parte de América Central. La forma más efectiva de reducir esta degradación es introducir nuevas estufas más eficientes (25-30% frente a 10-15% tradicional); donde esta sustitución ha tenido más éxito es en China, donde antes de terminar el siglo XX el 75% de los hogares rurales poseía estufas eficientes (Smil, 2013).

Al mismo tiempo, cuando hablamos de madera es erróneo pensar solo en los bosques, porque en muchos países pobres gran parte de la materia leñosa es recogida por las familias (generalmente mujeres y niños) en pequeños arbolados y arbustos, en plantaciones de árboles (caucho, coco) y en árboles de carretera y patios traseros. Encuestas realizadas en Bangladesh, Pakistán y Sri Lanka muestran que la madera no forestal representa más del 80% de la combustión (RWEDP, 1997). Por lo menos el 20% de los residuos de cultivo producidos en países pobres sigue quemándose, y el estiércol seco sigue siendo importante en algunas regiones de Asia, aunque el carbón vegetal se ha convertido en el biocombustible más importante. Como cabía esperar, China y la India son los mayores consumidores mundiales de biocombustibles tradicionales, seguidos por Brasil e Indonesia, aunque en términos relativos nadie compite con el África subsahariana, donde a finales del siglo XX algunos países obtenían más del 80% de la energía rural de la madera y los residuos de cultivos, en comparación con el 25% en Brasil y menos del 10% en China (Smil, 2013a). Medidos per cápita, estos niveles de consumo oscilan entre 5 y 25 GJ/año.

En las últimas décadas del siglo XX emergió una producción de etanol relativamente importante. Los experimentos con etanol y automóviles son anteriores a la Segunda Guerra Mundial (Henry Ford fue uno de sus impulsores), pero la producción moderna de etanol a gran escala comenzó en 1975 con el programa brasileño ProÁlcool, que fermentaba el combustible a partir de caña de azúcar (Macedo,

Leal y Da Silva, 2004; Basso, Basso y Rocha, 2011). La producción estadounidense de etanol a base de maíz comenzó en 1980 (Solomon, Barnes y Halvorsen, 2007). La producción brasileña lleva estancada desde 2008, y es poco probable que la producción en Estados Unidos, cuyo volumen creciente fue ordenado en 2007 por el Congreso, aumente en los próximos años. También existe una industria de biodiésel, mucho más pequeña, que produce combustible líquido a partir de fitomasa rica en aceite, como la soja, la colza y el fruto de la palma (USDOE, 2011). La producción mundial de biocombustible líquido alcanzó 75 Mt eq de petróleo en 2015, lo que representa el 1,8% de la energía extraída anualmente del petróleo (BP, 2016). El crecimiento de esta industria para que suministre una parte significativa del biocombustible líquido del mundo es, hablando en plata, una ilusión (Giampietro y Mayumi, 2009; Smil, 2010a).

El uso de la energía potencial y cinética del agua para generar electricidad es la segunda fuente de energía renovable más importante del mundo, después de los biocombustibles tradicionales y modernos. La generación de energía hidroeléctrica comenzó en 1882, en paralelo a la generación térmica, cuando una pequeña noria de agua en el río Fox en Appleton, Wisconsin, accionó dos dinamos para producir 25 kW para 280 bombillas de baja intensidad (Dyer y Martin, 1929). Antes del final del siglo se construyeron presas cada vez más altas en los países alpinos, Escandinavia y Estados Unidos. Pero la primera gran central de CA, construida en el Niágara en 1895, todavía era pequeña (37 MW) comparada con los proyectos que se desarrollarían durante la década de 1930 en Estados Unidos (con el apoyo de la Autoridad del Valle de Tennessee para el New Deal y la Oficina para la Recuperación de Estados Unidos) y en la URSS, como parte del proceso de industrialización estalinista (Allen, 2003). Los proyectos estadounidenses más grandes de la época fueron las presas Hoover, en el río Colorado (1936; 2,08 GW), y Grand Coulee, en el río Columbia, cuya primera etapa se completó en 1941 (finalmente 6,8 GW).

Las tres décadas posteriores a la Segunda Guerra Mundial transformaron la energía hidroeléctrica en la fuente de casi el 20% de toda la electricidad del mundo, con grandes proyectos en Brasil, Canadá, la URSS, Congo, Egipto, la India y China. En la mayoría de países el desarrollo de nuevos proyectos se ha ralentizado o detenido desde la década de 1980, excepto en China, donde la mayor presa del mundo —Sanxia, la presa de las Tres Gargantas (18,2 GW de capacidad instalada en 26 unidades)— se terminó en 2012 (Chincold, 2015). En 2015, las turbinas de agua suministraron el 16% de la electricidad del mundo, con porcentajes de hasta el 60% en Canadá y casi el 80% en Brasil, e incluso superiores en varios países africanos más pequeños.

Existen dos tipos de conversión de energía renovable que han recibido especial atención en los últimos años: la electricidad eólica y la solar. Este interés tiene que ver con su rápida expansión —entre 2010 y 2015 la generación eólica se multiplicó por 2,5 y la solar por 8 — y con las expectativas (muy exageradas) respecto a su futura tasa de adopción. El crecimiento rápido es un atributo común en las primeras etapas de desarrollo de cualquier fuente de energía, pero la contribución de estas dos fuentes de electricidad sigue siendo insignificante a escala mundial (en 2015 el viento generó el 3,5% de la electricidad mundial y la radiación solar directa el 1%). La integración de grandes flujos de este tipo de energía intermitente (muchas turbinas eólicas funcionan solo el 20-25% del tiempo, algunos parques marinos alcanzan el 40%) en las redes eléctricas actuales conlleva muchos desafíos (JP Morgan, 2015).

El desarrollo de la energía eólica moderna se inició con la creación de créditos fiscales en Estados Unidos a principios de la década de 1980 y terminó abruptamente cuando estos expiraron en 1985 (Braun y Smith, 1992). Europa se convirtió en un nuevo líder durante la década de 1990 cuando varios países —Dinamarca, Reino Unido, España y sobre todo Alemania como parte de su *Energiewende*— adoptaron políticas diseñadas para acelerar la transición hacia la

electricidad renovable. Los costes han ido reduciéndose y el desarrollo de aerogeneradores más grandes (hasta 8 MW; generalmente entre 1 y 3 MW) y parques eólicos más grandes (también en alta mar) han impulsado el crecimiento desde menos de 2 GW de capacidad instalada en 1990 hasta 17,3 GW en 2000 y 432 GW a finales de 2015 (Consejo Mundial de Energía Eólica, 2015).

El efecto fotovoltaico, esto es, la generación de electricidad mediante electrodos metálicos expuestos a la luz, fue descubierto por Edmund Becquerel (1820-1891) en 1839, pero hubo que esperar hasta 1954 para que los Laboratorios Bell produjeran costosas y poco eficientes (eficiencia inicial del 4,5% y más adelante del 6%) células solares de silicio, que se utilizaron por primera vez en 1958 para alimentar el satélite Vanguard 1 (solo 0,1 W). Cuatro años más tarde, en 1962, el primer satélite comercial de telecomunicaciones, Telstar 1, se alimentaba con células fotovoltaicas de 14 W, y en 1964 los satélites Nimbus utilizaban células con 470 W de capacidad (Smil, 2006). Las aplicaciones espaciales, en las que el coste no es una consideración prioritaria, prosperaron durante décadas, pero el uso terrestre para la generación de electricidad se vio limitado precisamente por los costes, de tal manera que la industria comenzó a crecer solo al final de la década de 1990. En cuanto a la potencia máxima (disponible únicamente durante unas pocas horas al día, incluso cuando hace sol), solo se fabricaron 50 MW de células fotovoltaicas en 1990, 17 GW en 2010 y 50 GW en 2015, año en que la capacidad acumulada representaba 2272q GW (James, 2015; REN21, 2016).

La generación fotovoltaica tiene factores de capacidad aún más bajos que el viento (con un seguimiento fijo en climas nublados de solo el 11-15% y alrededor del 25% incluso en climas soleados como el de Arizona), de tal manera que en 2015 la generación de electricidad fotovoltaica mundial fue solo del 30% del total generado por las turbinas eólicas (figura 5.16). Una vez más, el crecimiento de la industria no ha sido un proceso gradual y orgánico, sino una consecuencia de las subvenciones gubernamentales: no existe mejor

ilustración de este fenómeno que el hecho de que en 2015 la nublada Alemania produjera 3 veces más electricidad fotovoltaica que la soleada España (BP, 2016). El uso de la energía solar para calentar agua, utilizando pequeños calentadores de techo en viviendas y grandes conjuntos industriales, es anterior a la expansión de la generación fotovoltaica. A finales de 2012 la capacidad instalada de energía solar térmica era de 270 GW, principalmente en China y Europa (Mauthner y Weiss, 2014). La energía termosolar de concentración (CSP, por sus siglas en inglés), en la que se utilizan espejos para concentrar la radiación solar a fin de calentar agua (o sal) para la generación de electricidad, es una alternativa útil a la electricidad fotovoltaica, pero en 2015 solo existían unas pocas centrales con una capacidad total inferior a 5 GW.

En comparación con este *big four* —los biocombustibles, la energía hidroeléctrica, la eólica y la fotovoltaica—, las demás conversiones renovables son insignificantes a escala mundial, aunque alguna pueda ser importante a escala nacional e incluso regional, especialmente la energía geotérmica. Las fuentes y pozos calientes se utilizan desde tiempos inmemoriales, y los pozos más profundos suministran ahora agua caliente para calefacción y procesos industriales en muchos países. Pero los lugares donde esta energía puede recuperarse como vapor caliente natural y utilizarse para generar electricidad son poco habituales. La primera central geotérmica del mundo comenzó a funcionar en Larderello, en Italia, en 1902; la neozelandesa Wairakei entró en funcionamiento en 1958, y los Geysers californianos en 1960. En 2014, la capacidad instalada mundial era de 12 GW. Estados Unidos es el país con más capacidad instalada e Islandia el que más depende de esta energía renovable (Asociación de Energía Geotérmica, 2014).

Ninguno de los planes ya antiguos que existen para el desarrollo de grandes centrales de energía mareomotriz se ha realizado nunca; solo existen unas pocas centrales pequeñas en Francia y China. Por otro lado, depender de nuevas plantaciones de árboles de crecimiento

rápido (como sauces, álamos, eucaliptos o pinos) para obtener astillas de madera destinadas a la generación de electricidad es una opción rodeada de muchos problemas ambientales. Asimismo, los residuos de cultivo y otros desechos orgánicos ahora también se utilizan para la producción de biogás a gran escala (sobre todo en Alemania y China), pero su contribución solo es relevante a escala local. A pesar de las muchas opciones renovables disponibles, algunos progresos rápidos y numerosas afirmaciones contradictorias, el veredicto fundamental es muy claro: como ocurre con toda transición energética, el abandono de los combustibles fósiles será un proceso largo, y habrá que esperar a ver cómo evolucionan las diferentes conversiones para determinar el papel que pueda jugar cada energía en un nuevo mundo energético.

Figura 5.16 Planta fotovoltaica de Lucainena de las Torres, en Andalucía (Corbis).

Motores primarios en el transporte

La última sección de mi estudio sobre los avances técnicos que determinan los fundamentos energéticos de las sociedades modernas analizará los principales motores del transporte, desde humildes motores pequeños hasta potentes cohetes. El desarrollo de los motores de ciclo Otto (actualmente alimentados en su inmensa mayoría por gasolina, con permiso de incursiones puntuales del etanol y el gas natural) ha sido bastante conservador desde la primera década del siglo XX, cuando comenzó su producción en masa. Los cambios más importantes incluyen una duplicación aproximada de la ratio de compresión, su menor peso y un aumento de la potencia, lo cual ha dado lugar a una reducción de la relación masa/potencia, que ha pasado de 40 g/W en 1900 a solo 1g/W un siglo más tarde. El primer coche producido en masa en Estados Unidos, el Curved Dash de Ransom Old, tenía un motor monocilíndrico de 5,2 kW (7 hp). El Ford T, cuya producción terminó en 1927 tras 19 años y 16 millones de unidades vendidas, tenía un motor tres veces más potente.

El aumento de la potencia media de los automóviles estadounidenses se vio interrumpido por el incremento de los precios del petróleo en la década de 1970 y se reanudó en la década de 1980: la potencia media pasó de 90 kW en 1990 a 175 kW en 2015 (USEPA, 2015). Pero *coche* es un término equivocado, porque en Estados Unidos el 50% de los vehículos ligeros utilizados para el transporte personal son furgonetas, camionetas y todoterrenos. Los motores diésel también son ahora relativamente más ligeros y mucho más potentes que antes, mejoras que han hecho que sean dominantes en varios segmentos de mercado clave (Smil, 2010b). Los primeros camiones con motor diésel aparecieron en Alemania en 1924 y los primeros automóviles personales pesados con este tipo de motor, en 1936, también en Alemania. Justo antes de la Segunda Guerra Mundial, la mayoría de los nuevos camiones y autobuses europeos eran diésel, y después de la guerra esto se transformó en una regla mundial. Los motores diésel de autobús, de hasta 350 kW, tienen una

relación masa/potencia de 3-9 g/W y pueden recorrer hasta 600.000 km sin necesidad de una revisión importante.

La relación masa/potencia de los motores diésel de automóvil acabó bajando hasta 2 g/W, lo que significa que son solo ligeramente más pesados que los de gasolina (Smil, 2010b). La reducción del coste del combustible hizo que los automóviles diésel fueran comunes en la Unión Europea, donde ahora representan más del 50% de las nuevas matriculaciones (ICCT, 2104). Sin embargo, en Estados Unidos siguen siendo poco habituales: en 2014 representaban menos del 3% del parque automovilístico. Y la imagen de marca del diésel ha sufrido mucho desde que en 2015 Volkswagen se viera obligada a admitir que muchos modelos diésel vendidos desde 2008 contenían software ilegal para falsear las emisiones de los motores que se probaban para pasar las regulaciones ambientales relativas a los óxidos de nitrógeno en Estados Unidos.

Las locomotoras diésel (hasta 3,5 MW) tiran (y empujan) trenes de carga en todos los sistemas ferroviarios no electrificados del mundo. Como ya se ha señalado, los motores diésel comenzaron su conquista de la navegación marítima antes de la Primera Guerra Mundial, y con el tiempo se han convertido en motores primarios indispensables para la globalización, ya que todo el comercio mundial de recursos energéticos, materias primas, desechos reciclables, alimentos, pienso y productos manufacturados que se realiza por agua se hace utilizando este tipo de motor, muy masivo y eficiente (Smil, 2010b). Los diésel marinos más potentes en superpetroleros y grandes graneleros, diseñados en Europa por MAN y Wärtsilä y construidos en Corea del Sur y Japón, tienen potencias de hasta casi 100 MW.

Los motores de explosión de avión mejoraron muy rápidamente. Los que alimentaban el Clipper de Boeing de 1936 (un gran hidroavión que volaba en servicio regular entre la costa oeste de Estados Unidos y Asia oriental) eran 130 veces más potentes que el motor de Wright de 1903, cuya relación peso/potencia era más de 10 veces mayor (figura 5.17). Las turbinas de gas —motores primarios

totalmente nuevos que han revolucionado el vuelo y el rendimiento de muchas industrias— se conceptualizaron con cierto detalle a principios del siglo XX, pero los primeros diseños funcionales no aparecieron hasta el final de la década de 1930. Frank Whittle en Inglaterra y Hans Pabst von Ohain en Alemania desarrollaron de manera independiente turbinas de gas para aviones militares, aunque los primeros cazas de reacción llegaron demasiado tarde como para afectar al curso de la Segunda Guerra Mundial (Constant, 1981; Smil, 2010b).

El rápido desarrollo de este nuevo tipo de motor siguió después de 1945. La velocidad del sonido fue superada por primera vez el 14 de octubre de 1947 por el Bell X-1. Desde entonces se han diseñado decenas de cazas y bombarderos supersónicos, siendo el caza más rápido el MiG-35, con una velocidad máxima de 3,2 Mach. El despliegue de las turbinas de gas hizo que los vuelos intercontinentales fueran asequibles: su relación masa/potencia (con un empuje de 500 kN es solo de 0,06-0,07 g/W), su relación empuje/peso (>6 en los motores comerciales, 8,5 en los motores militares más potentes) y su relación de derivación (cuyo valor actual más alto es 12:1: el 92% del aire comprimido por el motor no pasa por su cámara de combustión, lo cual disminuye el consumo específico de combustible y reduce el ruido del proceso) han caracterizado la evolución del diseño de este tipo de motor, cada vez más potente y eficiente (figura 5.17). Además, las turbinas de gas en vuelo se volvieron tan fiables que ahora los aviones bimotores no solo cruzan el Atlántico, sino que también realizan muchas rutas transpacíficas (Smil, 2010b).

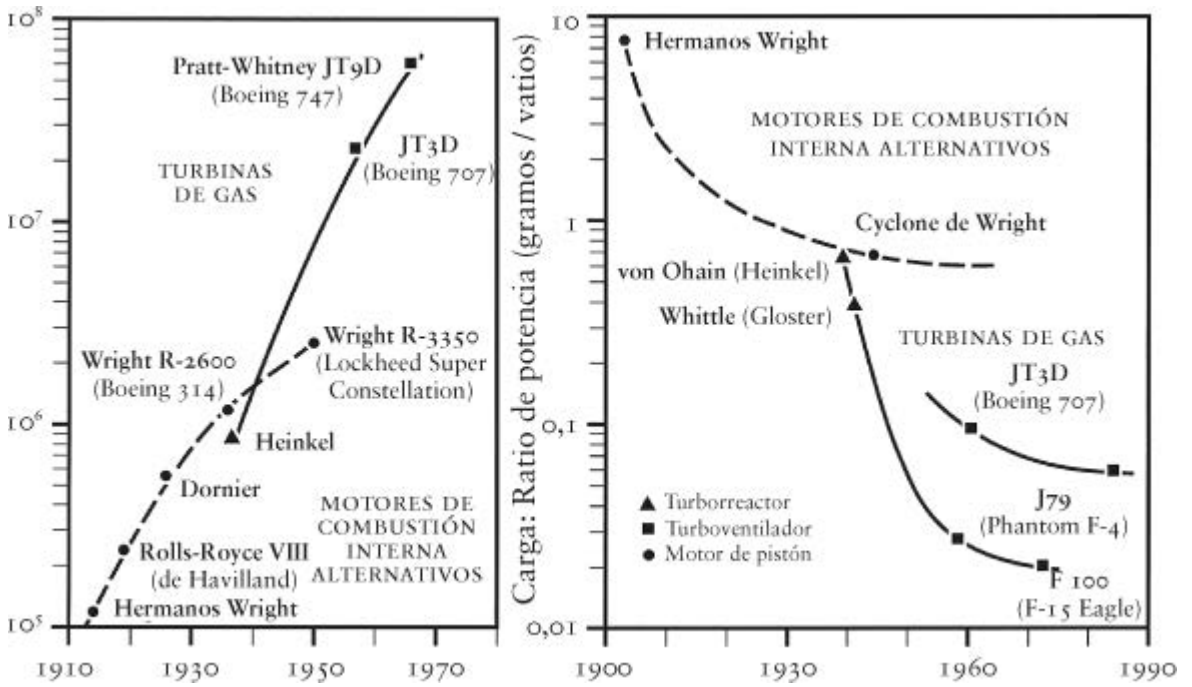


Figura 5.17 El desarrollo de motores cada vez más potentes y ligeros ha hecho posible el progreso continuo del vuelo. Justo antes de que los motores de pistón alcanzaran su rendimiento límite, los motores de reacción comenzaron sus espectaculares avances. Hoy en día, los que propulsan grandes aviones de Boeing y Airbus pesan menos de 0,1 g/W, una mejora de factor 100 comparado con el primer diseño de pistón de los Wright. Los motores de los *jets* militares son aún más ligeros. Fuentes: Constant (1981), Gunston (1986), Taylor (1989) y Smil (2010b).

Como suele ocurrir en las industrias más maduras, el mercado mundial de motores de reacción ha pasado a estar dominado por solo cuatro fabricantes: Rolls-Royce, que fue el primero en vender motores comerciales en 1953; dos empresas estadounidenses, General Electric y Pratt & Whitney; y CFM International, una *joint-venture* creada por General Electric y la francesa Snecma Moteurs en 1974 que se ha especializado en la fabricación de motores para aeronaves de corto y medio recorrido (CFM International, 2015). Por otro lado, los vuelos del supersónico Concorde (el primero se comercializó en 1976) resultaron ser demasiado caros para el mercado de pasajeros, y el servicio terminó en 2003 (Darling, 2004).

El primer avión de pasajeros fue el British Comet, en 1952, pero diferentes defectos estructurales provocaron tres accidentes mortales y

su consiguiente retirada. El Comet fue rediseñado y voló de nuevo en 1958, pero no tuvo éxito comercial (Simons, 2014). El primer avión de reacción comercial de éxito fue el Boeing 707, introducido en 1958 (figura 5.18). El primer Boeing 747 de fuselaje ancho voló por primera vez en 1969: este icónico modelo estaba propulsado por grandes motores turbofán que tenían más de 200 kN de empuje y podían proporcionar un empuje máximo combinado de 280 MW durante el despegue (Smil, 2000c). En 2015 el motor de reacción más potente, el GE 90-115B, tenía un empuje de 513 kN.

Los únicos motores primarios que ofrecen más potencia por unidad de peso que las turbinas de gas son los motores de los cohetes que impulsan misiles y vehículos espaciales. Los fundadores de la cosmonáutica —Constantin Tsiolkovsky (1857-1935) en Rusia, Hermann Oberth (1894-1989) en Alemania y Robert H. Goddard (1882-1945) en Estados Unidos— vislumbraron con acierto el éxito de la antigua idea de la propulsión de cohetes, con la que la ingeniería moderna fabricaría después los motores más potentes del mundo (Hunley, 1995; Angelo, 2003; Taylor, 2009). El proceso comenzó durante la Segunda Guerra Mundial: en 1942, el misil alemán V-2, alimentado por etanol y diseñado por Wernher von Braun (1912-1977), alcanzó un empuje al nivel del mar de 249 kN (equivalente a 6,2 MW y una relación masa/potencia de 0,15 g/W) y una velocidad máxima de 1,7 km/s. Su alcance (340 km) fue suficiente para atacar Reino Unido (Von Braun y Ordway, 1975).

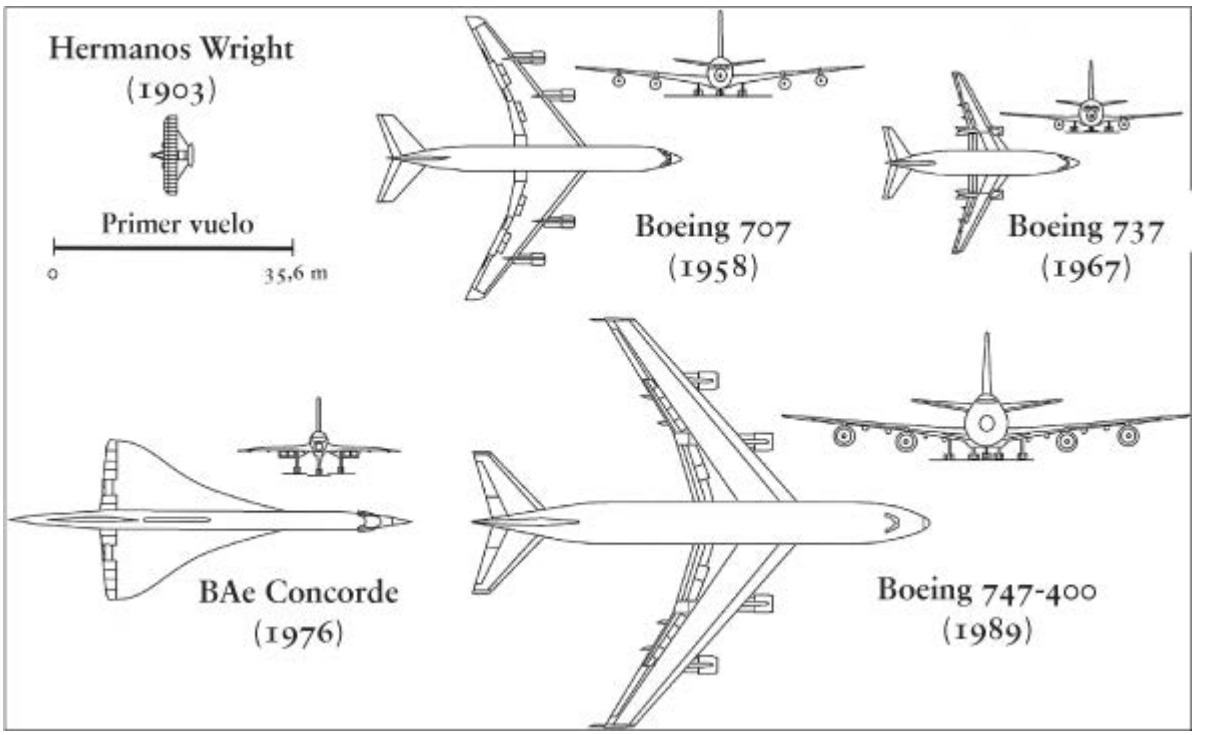


Figura 5.18 Vistas de planta y frontales de aviones de reacción. El Boeing 707 (1957) poseía un buque cisterna de reabastecimiento en vuelo. El Boeing 737 (1967) es el avión de reacción más vendido de todos los tiempos (en 2015 se habían fabricado 9.000 unidades y encargado 13.000 más). El supersónico Concorde franco-británico, que realizó algunas rutas entre 1976 y 2003, fue un experimento muy costoso. El Boeing 747 (en funcionamiento desde 1969) fue el primer avión de largo recorrido de fuselaje ancho. A modo de comparación de escala, se muestra el avión de los hermanos Wright y su trayectoria de vuelo total el 7 de diciembre de 1903. Fuente: publicaciones de Boeing y Aerospatiale/BAe y Jakab (1990).

La carrera espacial comenzó con el lanzamiento del primer satélite artificial de la historia, el Sputnik soviético, en 1957, y trajo consigo la fabricación de misiles balísticos intercontinentales cada vez más potentes y precisos. El 16 de julio de 1969 los once motores de queroseno e hidrógeno del cohete estadounidense Saturno C-5 (cuyo diseñador principal fue también Wernher von Braun) pusieron en movimiento la nave espacial Apolo en su viaje a la Luna. Solo funcionaron durante 150 segundos y su empuje combinado alcanzó 36 MN, el equivalente de 2,6 GW y una relación masa/potencia

(incluyendo el peso del combustible y tres cohetes de refuerzo) de 0,001 g/W (Tate, 2009).

6

CIVILIZACIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES

El contraste es claro. Las sociedades preindustriales aprovechaban flujos de energía solar casi instantáneos y solo convertían una fracción insignificante de los casi inagotables recursos por radiación. La civilización moderna depende de la extracción de gigantes depósitos de energía, agotando las reservas finitas de combustibles fósiles, que no pueden ser repuestos ni siquiera a una escala temporal varios órdenes de magnitud más elevada que la historia de nuestra especie. El uso de la fisión nuclear y las energías renovables modernas (la generación de electricidad eólica y fotovoltaica, la hidroelectricidad, que ya tiene más de 130 años, y nuevas formas de transformar la fitomasa en combustibles) ha ido en aumento, pero en 2015 los combustibles fósiles todavía representaban el 86% de la energía primaria mundial, solo un 4% menos que 25 años antes, en 1990 (BP, 2016).

Al recurrir a las reservas fósiles, hemos creado sociedades que transforman cantidades de energía sin precedentes. Esta transformación ha traído consigo enormes avances en la productividad agrícola y el rendimiento de los cultivos; ha dado lugar, en primer lugar, a una rápida industrialización y urbanización, la

expansión y aceleración del transporte, y un crecimiento aún más impresionante de nuestra capacidad para informar y comunicar; y todos estos avances combinados han producido largos periodos de rápido crecimiento económico, y, por consiguiente, han creado riqueza, han elevado la calidad de vida media de la mayor parte de la población mundial y, en última instancia, han desembocado en nuevas economías de servicios muy consumidores de energía.

No obnstante, el uso de este poder sin precedentes ha tenido muchas consecuencias negativas y ha dado lugar a cambios que, en caso de continuar, pueden poner en peligro los fundamentos de la civilización moderna. La urbanización ha sido una fuente importante de innovación, progreso técnico, mejora del nivel de vida, crecimiento de los flujos de información y comunicación instantánea, etc., pero también ha sido un factor clave en el deterioro del medio ambiente y en el preocupante crecimiento de las desigualdades. La distribución desigual de los recursos energéticos tiene consecuencias tanto nacionales como internacionales: desde las disparidades regionales hasta la perpetuación de regímenes corruptos y a menudo intolerantes o abiertamente violentos.

Las armas modernas, que también son muy consumidoras de energía, han aumentado el poder destructivo de los países del mundo en muchos órdenes de magnitud en comparación con el mundo preindustrial, de tal manera que los conflictos armados modernos generan muchas más bajas tanto militares como civiles. Por encima de todo, el desarrollo de armas nucleares ha hecho que, por primera vez en la historia, sea posible, si no destruir, al menos paralizar en buena medida toda vida civilizada. Al mismo tiempo, algunos de los medios más duros de agresión y guerra modernos no requieren el control de energías concentradas, sino que dependen de formas de terrorismo individual. Pero incluso si la civilización moderna evita un conflicto termonuclear a gran escala, seguirá enfrentándose a numerosas y profundas incertidumbres. Desde luego, el desafío más acuciante es la degradación generalizada del medio ambiente. Este cambio tiene que

ver con la extracción y conversión tanto de combustibles fósiles como de energías no fósiles, así como con la industrialización, la urbanización, la globalización económica, la deforestación y las prácticas inadecuadas de cultivo y cría de animales.

Estos cambios han tenido consecuencias que van mucho más allá de la esfera local o regional: tienen efectos desestabilizadores en la biosfera mundial, empezando por las numerosas consecuencias indeseables de un calentamiento global que progresa relativamente deprisa. La civilización moderna ha traído consigo una auténtica explosión del consumo energético y ha extendido nuestro control sobre las fuentes de energía inanimada hasta niveles impensables. Esto ha hecho que sea increíblemente liberadora y constructiva, pero también terriblemente limitante, destructiva y en muchos sentidos autodestructiva. Todos estos cambios han comportado generaciones de fuerte crecimiento económico y una creencia generalizada en que este proceso, alimentado por un ritmo de innovación incesante, no tiene por qué terminar pronto. La realidad, sin embargo, es que su continuidad no está en absoluto garantizada.

UNA POTENCIA SIN PRECEDENTES

Aunque fuera interrumpido por dos guerras mundiales y la peor crisis económica de la historia en la década de 1930, el consumo de energía mundial creció a un ritmo sin precedentes durante las siete primeras décadas del siglo XX. Posteriormente se produjo una desaceleración muy rápida por la quintuplicación de los precios del petróleo por parte de la OPEP entre octubre de 1973 y marzo de 1974; el crecimiento se habría moderado incluso sin esa sacudida, porque los niveles absolutos habían crecido demasiado como para soportar tasas de crecimiento que solo son posibles a niveles agregados más bajos. Con todo, y aunque a un ritmo más lento, los enormes cambios cuantitativos han continuado, acompañados de nuevos y notables

avances cualitativos. Las estadísticas globales muestran el crecimiento exponencial sostenido de la producción de combustibles fósiles desde que comenzó su extracción a gran escala en el siglo XIX (Smil, 2000a, 2003, 2010a; BP, 2015; figura 6.1).

La minería del carbón se multiplicó por cien, de 10 Mt a 1 Gt, entre 1810 y 1910; alcanzó 1,53 Gt en 1950, 4,7 Gt en 2000 y 8,25 Gt en 2010, antes de bajar un poco, hasta 7,9 Gt, en 2015 (Smil, 2010c; BP, 2016). La extracción de petróleo se multiplicó por 300: de menos de 10 Mt a finales de la década de 1880 a más de 3 Gt en 1988; en 2000 fue de 3,6 Gt y en 2015 de 4,4 Gt (BP, 2016). La producción de gas natural se multiplicó por mil, de menos de 2 Gm^3 a finales de la década de 1880 a 2 Tm^3 en 1991; fue de 2,4 Tm^3 en 2000 y de 3,5 Tm^3 en 2015. Durante el siglo XX, la energía agregada derivada de la extracción mundial de energías fósiles se multiplicó por catorce.

Sin embargo, es mucho más eficaz expresar este crecimiento en términos de energía útil (calor, luz y movimiento realmente generados). Ya hemos visto que al principio la conversión de los combustibles fósiles fue bastante ineficiente (<2% para la luz incandescente, <5% para las locomotoras de vapor, <10% para la generación térmica de electricidad y <20% para las pequeñas estufas de carbón), y, aunque las mejoras en las calderas y estufas de carbón pronto duplicaron estas eficiencias, aún existía un gran potencial para futuras mejoras. Los hidrocarburos líquidos quemados en hornos domésticos o calderas industriales y de centrales eléctricas tienen mejores eficiencias de conversión. Solo los motores de combustión interna de gasolina en automóviles privados son relativamente ineficientes. La combustión del gas natural, sea en hornos, calderas o turbinas, es muy eficiente, generalmente superior al 90%, igual que la conversión de la electricidad primaria.

Por consiguiente, en 1900 la eficiencia media ponderada del consumo de energía mundial no superaba el 20 %; en 1950 superaba el 35 %; y en 2015 la media mundial de conversión de combustibles

fósiles y electricidad primaria había alcanzado el 50 % del total del consumo comercial. En 2013, las cuentas de la Agencia Internacional de la Energía (AIE, 2015a) mostraban un suministro primario mundial de 18,8 Gt de equivalente petróleo y un consumo final de 9,3 Gt de equivalente petróleo, situándose las mayores pérdidas, previsiblemente, en la generación y el transporte de electricidad térmica. Aún más notable es que en la calefacción doméstica —un sector de consumo clave—, poblaciones enteras hayan experimentado una transición de eficiencia total en cuestión de pocas décadas (recuadro 6.1).

Si bien el suministro total de energía fósil se multiplicó por catorce durante el siglo XX, el constante progreso de la eficiencia suministró más de treinta veces más energía útil que la disponible en 1900. En consecuencia, los países ricos, en los que los combustibles fósiles ya dominaban el suministro total en 1900, obtienen ahora más del doble e incluso el triple de energía útil por unidad de suministro de energía primaria que hace un siglo, y como la biomasa tradicional tenía una eficiencia de conversión muy baja (<1% para la luz y <10% para el calor), los países pobres en los que hubo que esperar a la segunda mitad de siglo XX para que las energías modernas fueran dominantes obtienen ahora comúnmente 5-10 veces más energía útil por unidad de suministro primario que hace un siglo. Calculado per cápita —con una población mundial de 1.650 millones de personas en 1900 y 6.120 millones en 2000—, la oferta de energía útil a nivel mundial se multiplicó por más de ocho, aunque esta media oculta grandes disparidades nacionales (veremos más sobre este tema más adelante).

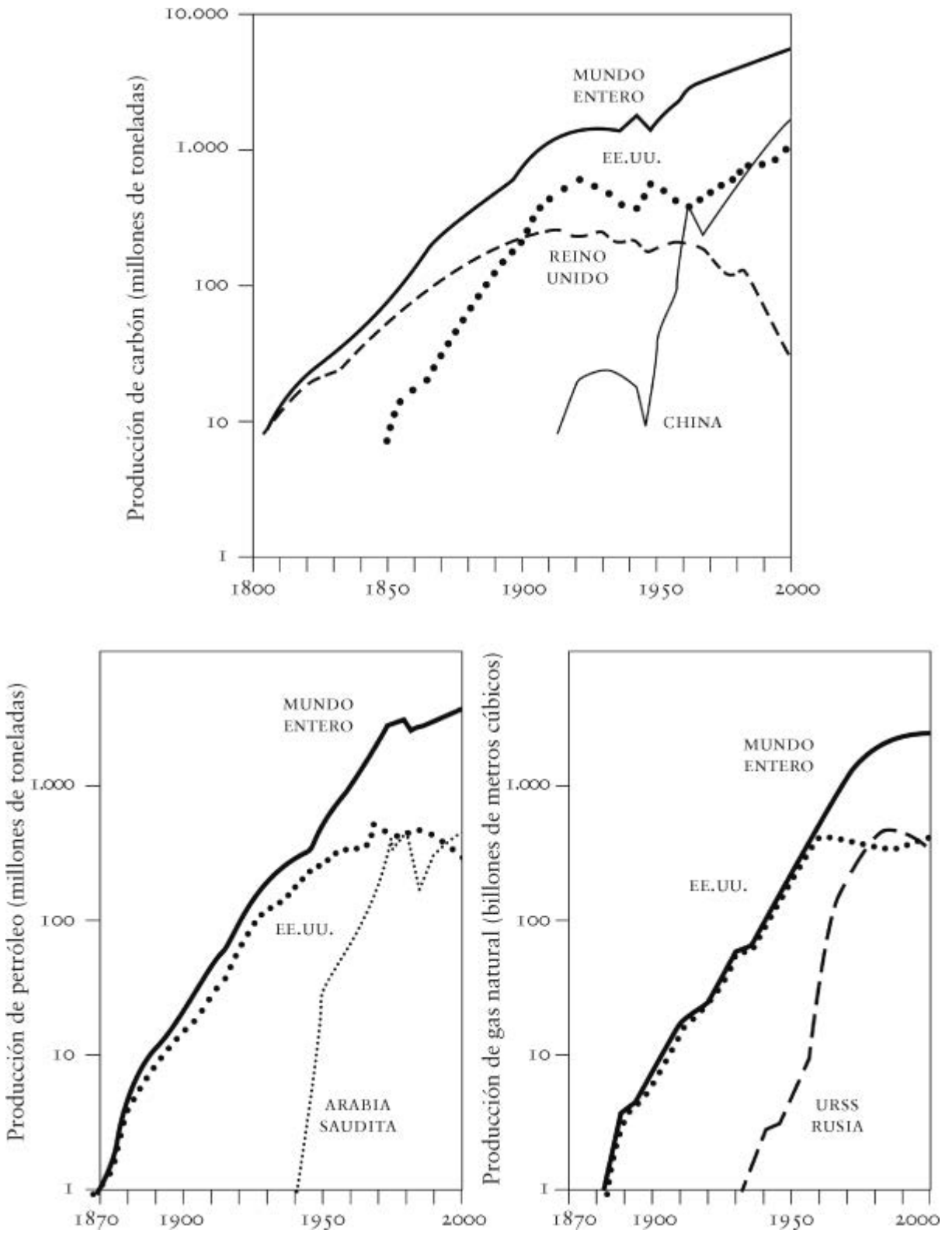


Figura 6.1 Totales mundiales y producción anual de los mayores productores de los tres principales combustibles fósiles. Fuentes: Naciones Unidas (1956), Smil (2010a) y BP (2015).

RECUADRO 6.1

Eficiencia de la calefacción doméstica

En menos de cincuenta años he vivido en casas calentadas por cuatro combustibles diferentes y he visto triplicarse la eficiencia de conversión de este servicio energético clave (Smil, 2003). A finales de la década de 1950, viviendo en un pueblo rodeado de bosque cerca de la frontera checo-bávara, calentábamos nuestra casa con leña, como la mayoría de nuestros vecinos. Mi padre ordenaba troncos precortados de abeto y era mi sumo deber cortarlos en trozos de madera listos para cocinar (y también en trozos más finos para leña) y luego apilarlos en un lugar protegido para que se secaran al aire libre. La eficiencia de nuestras estufas de leña no superaba el 30-35 %. Cuando estudié en Praga, todos los servicios energéticos —calefacción, cocina y generación de electricidad— dependían del lignito; la estufa de carbón que tenía en mi habitación, en un antiguo monasterio de paredes gruesas, tenía una eficiencia del 45 %. Después de mudarnos a Estados Unidos, alquilamos el piso superior de una casa situada en los suburbios: se calentaba con fueloil (nos lo traían en camión) y se quemaba en una caldera con una eficiencia no superior al 60 %. Nuestra primera casa en Canadá tenía una caldera de gas natural con una eficiencia del 65 %. Por último, cuando diseñé una nueva casa supereficiente, instalé una caldera de gas natural con una eficiencia del 94 %. Después la reemplacé por otra con una eficiencia del 97 %.

Otra forma de medir el tamaño agregado de los flujos de energía modernos es compararlos con los usos tradicionales tanto en términos absolutos como relativos. Las estimaciones más fiables muestran que el consumo de combustible de biomasa mundial pasó de 700 Mt en 1700 a 2,5 Gt en 2000. Esto representaría un crecimiento de 280 Mt a 1 Gt en términos de equivalente petróleo, un crecimiento multiplicado por (casi) cuatro en tres siglos (Smil, 2010a). Durante el mismo periodo, la extracción de combustibles fósiles aumentó de 10 Mt a 8,1 Gt de equivalente petróleo, lo que supone una multiplicación por 800 (figura 6.2). En términos de energía bruta, el suministro mundial de biocombustibles y combustibles fósiles era casi idéntico en 1900 (22

EJ en cada caso); en 1950 los combustibles fósiles suministraban casi tres veces más energía que la madera, los residuos de cultivo y el estiércol; y en 2000 la diferencia era ocho veces mayor. Cuando se ajusta a la energía útil realmente entregada, la diferencia en 2000 fue de unas veinte veces.

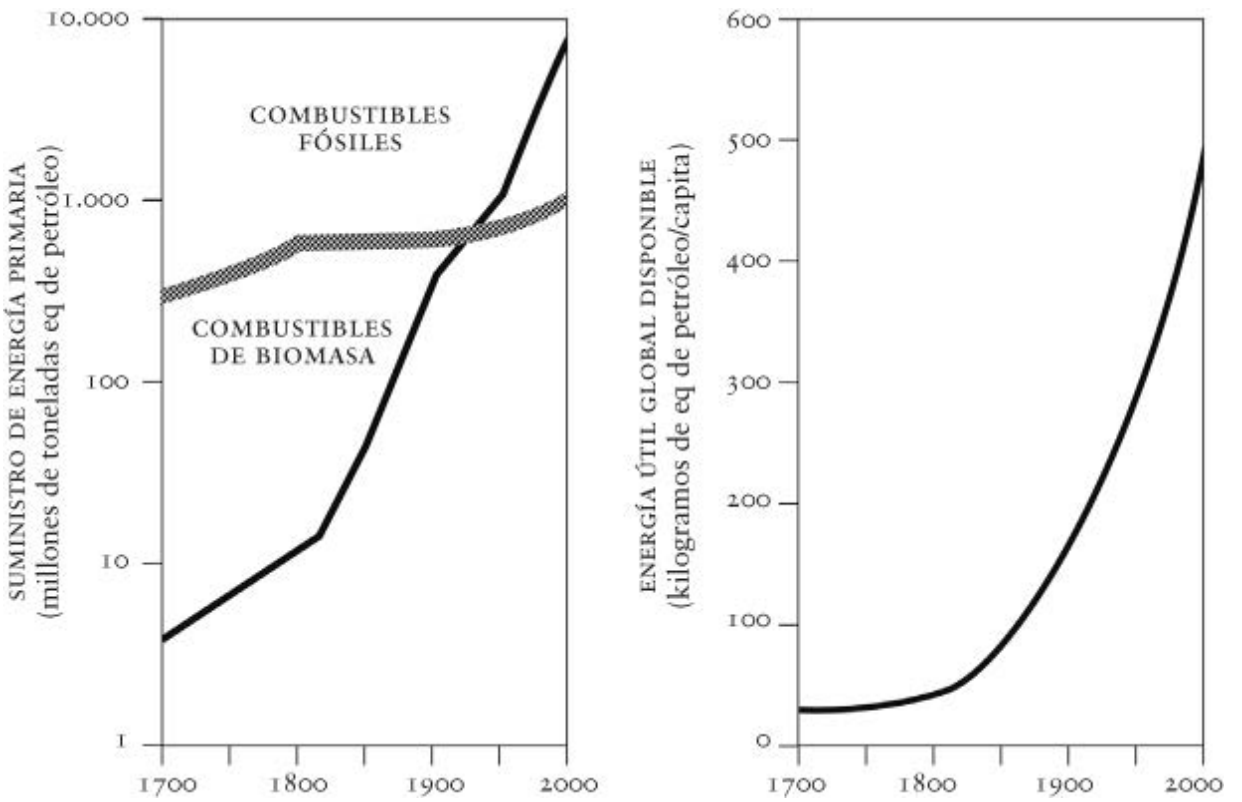


Figura 6.2 La producción mundial de combustibles fósiles superó el suministro total de biomasa tradicional justo antes de finales del siglo XIX (izquierda). El incremento de la energía útil fue más del doble del aumento del suministro primario total (derecha). Creado a partir de datos de las Naciones Unidas (1956) y Smil (1983, 2010a).

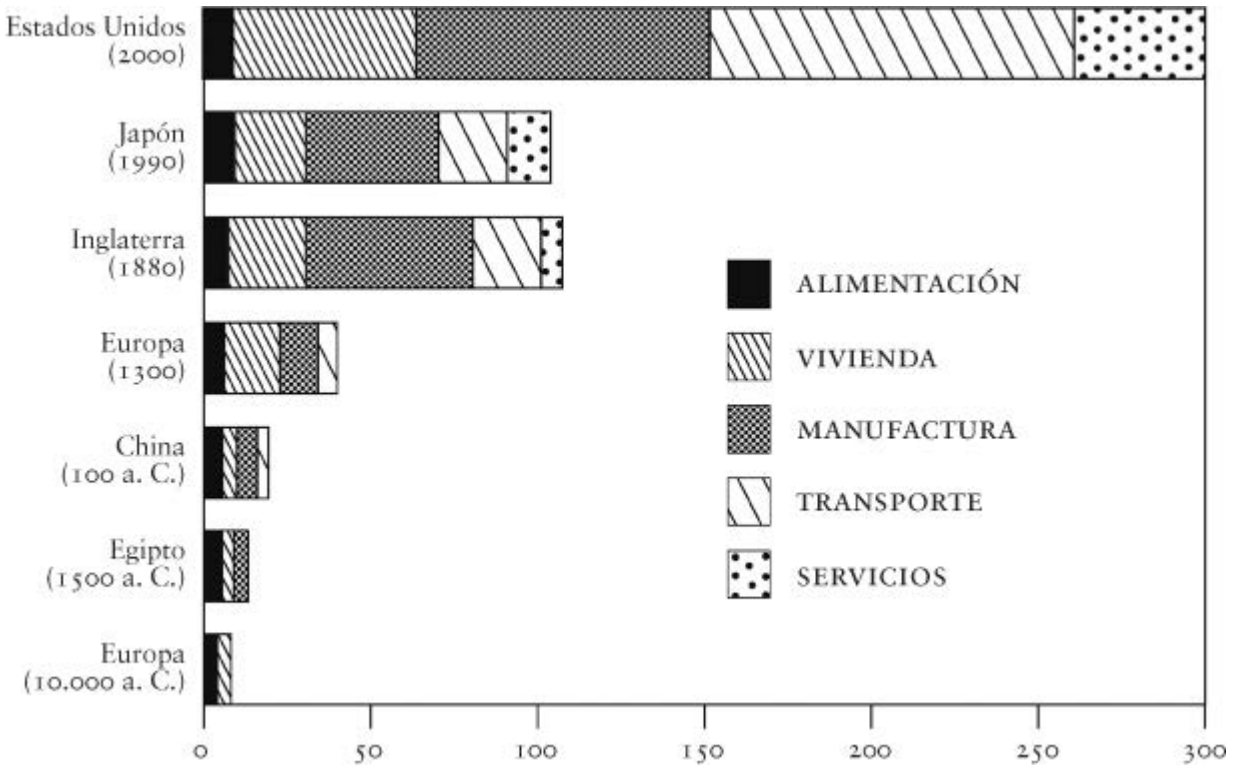


Figura 6.3 Comparaciones del consumo energético anual per cápita durante diferentes etapas de la historia de la humanidad. El gran aumento del consumo absoluto ha ido acompañado del aumento de la proporción de energía utilizada en el hogar, la industria y el transporte. Los valores anteriores al siglo XIX son aproximaciones basadas en Smil (1994, 2010c) y Malanima (2013a); las cifras posteriores proceden de fuentes estadísticas públicas a nivel nacional.

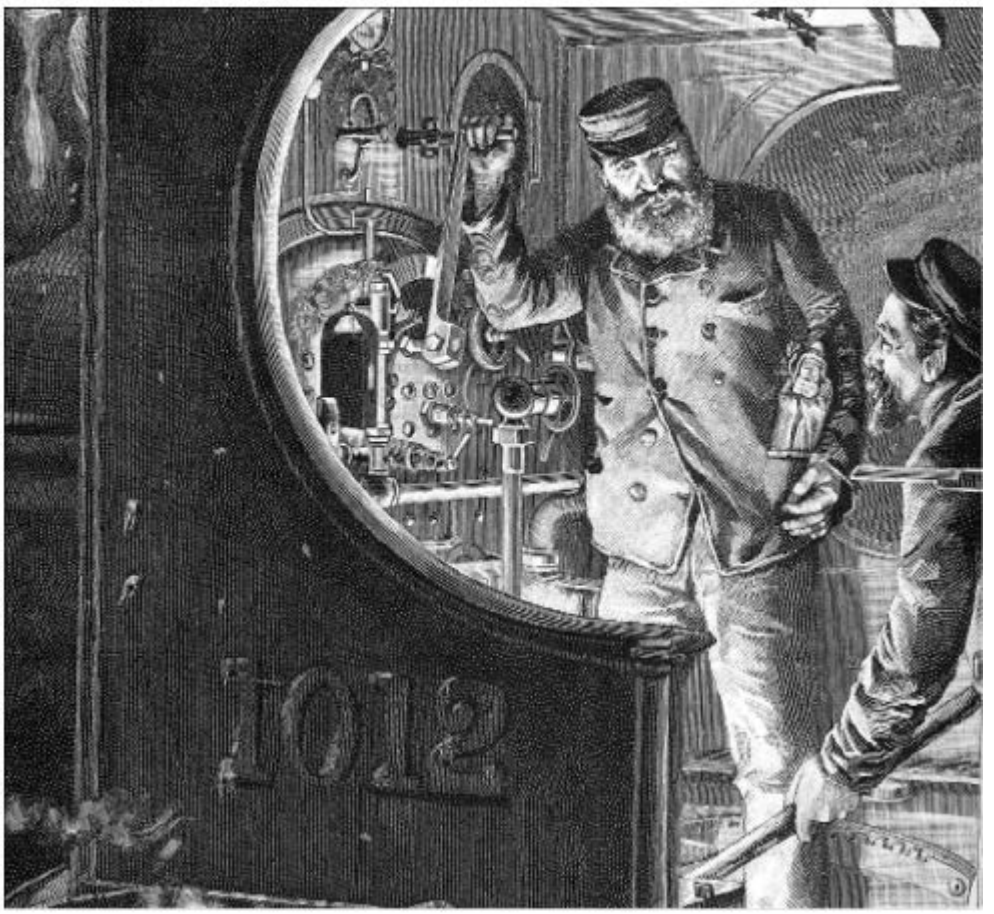
El crecimiento del consumo energético llevó los niveles de consumo medio per cápita a cotas sin precedentes (figura 6.3). El requisito energético de las sociedades de cazadores-recolectores estaba dominado por el suministro de alimento. Su consumo anual medio no superaba los 5-7 GJ/cápita. Las antiguas altas culturas siguieron un patrón de crecimiento lento del consumo energético para mejorar la calidad de la vivienda y la ropa, el transporte (alimentado mediante alimentos, pienso y viento) y una variedad de manufacturas (con el carbón vegetal en primer plano). En Egipto el Imperio Nuevo tuvo un consumo medio de no más de 10-12 GJ/cápita, y, según mis propias estimaciones, el consumo del Imperio romano en sus primeros compases fue de 18 GJ/cápita (Smil, 2010c). Las primeras sociedades

industriales duplicaron el consumo de energía per cápita. La mayor parte del aumento se destinó a la fabricación y el transporte de carbón. Malanima (2013b) sitúa el promedio europeo en 22 GJ/t en 1500, seguido de un estancamiento de 16,6-18,1 GJ/t hasta 1800.

Después se produjo una clara divergencia entre países industrializados y economías básicamente agrícolas. Kander (2013) indica que la media de Inglaterra y Gales pasó de 60 GJ/cápita en 1820 a 153 GJ/cápita en 1910, y que durante ese mismo periodo la tasa alemana se quintuplicó (de 18 a 86 GJ/cápita), la francesa se triplicó (de 18 a 54 GJ/cápita) y la italiana solo se dobló (de 10 a 22 GJ/cápita). A modo de comparación, la tasa media de Estados Unidos pasó de 70 GJ/cápita a 150 GJ/cápita (Schurr y Netschert, 1960). Un siglo más tarde, todos los países europeos más ricos superaban los 150 GJ/cápita y Estados Unidos los 300 GJ/cápita. Y a medida que la tasa media aumentaba, la composición también cambiaba (figura 6.3).

En las sociedades de cazadores-recolectores, la comida era prácticamente la única forma de consumo de energía. En los inicios del Imperio romano, estimo que la alimentación y el forraje representaban el 45 % del consumo energético (Smil, 2010c). En la Europa preindustrial, la alimentación y el forraje oscilaban entre el 20 % y el 60 %, pero en 1820 la media no superaba el 30 %. En 1900, era menos del 10 % en Reino Unido y Alemania. En la década de 1960, la energía del forraje alcanzó un nivel insignificante y la de los alimentos no superaba el 3 % e incluso el 2% del consumo de energía en las sociedades más prósperas, consumo que pasó a estar dominado por la industria, el transporte y los usos domésticos de combustibles y electricidad (figura 6.3). En las economías más ricas la producción de electricidad per cápita ha aumentado en dos órdenes de magnitud: en 2010 era de 7 MWh/año en Europa occidental y 13 MWh/año en Estados Unidos. La evolución de los flujos de energía controlados directamente por individuos no es menos impresionante.

(a)



(b)

Figura 6.4 Alimentación de una locomotora de vapor a finales del siglo XIX (arriba) y cabina de pilotaje de un avión de línea Boeing (abajo). El piloto y el copiloto controlan dos órdenes de magnitud más de potencia que el fogonero y el ingeniero de la locomotora. Locomotora del archivo VS; cabina del Boeing. Fuente: wallpapers-desk.net/wp-content/uploads/2015/08/2931_boeing_747.jpg.

Cuando en 1900 un agricultor de las Grandes Llanuras llevaba las riendas de seis grandes caballos mientras araba su campo de trigo, controlaba —con un considerable esfuerzo físico, encaramado en un asiento de acero y a menudo envuelto en polvo— no más de 5 kW de energía animal. Un siglo más tarde, su bisnieto, sentado muy por encima del nivel del suelo en una cómoda cabina de tractor climatizada, controlaba sin ningún esfuerzo más de 250 kW de potencia de motor diésel. En 1900 un ingeniero que operaba una locomotora de carbón que a su vez tiraba de un tren transcontinental a 100 km/h controlaba 1 MW de potencia de vapor, el máximo rendimiento que puede generar la alimentación manual de carbón (Bruce, 1952; figura 6.4). En 2000 el piloto de un Boeing 747 que recorre una ruta transcontinental a 11 km de altura podía activar el modo automático durante gran parte del viaje mientras cuatro turbinas de gas generaban 120 MW y el avión volaba a 900 km/h (Smil, 2000a).

Esta concentración de potencia también exige mayores precauciones de seguridad debido a las inevitables consecuencias de los errores de control. Los conductores de los autocares utilizados en los viajes interurbanos hasta el siglo XIX controlaban una potencia constante de no más de 3 kW (cuatro caballos), desplegada para transportar 4-8 personas; los pilotos de aviones comerciales interurbanos controlan 30 MW generados por los motores de reacción para transportar 150-200 pasajeros. Lógicamente, la falta de atención o una mala decisión tienen consecuencias muy diferentes según estén en juego 3 kW o 30 MW, una diferencia de cuatro órdenes de magnitud. Una forma obvia de reducir este riesgo es utilizar controles electrónicos.

El sistema de transporte público más seguro del mundo —el Shinkansen entre Tokio y Osaka, que el 1 de octubre de 2014 celebró 50 años de funcionamiento sin accidentes (Smil, 2014b)— centralizó los controles electrónicos desde el principio: un sistema de control automático de los trenes mantiene una distancia adecuada entre ellos y frena instantáneamente si un tren supera la velocidad máxima indicada; un sistema de control de tráfico centralizado lleva a cabo el control de la ruta; un sistema de detección de terremotos detecta las primeras ondas sísmicas que llegan a la superficie terrestre y puede detener o reducir la velocidad de los trenes antes de que llegue la sacudida principal (Noguchi y Fujii, 2000). Los aviones de pasajeros modernos han sido enormemente automatizados a lo largo del tiempo, y en la actualidad los controles avanzados se están volviendo comunes en los automóviles privados. El control electrónico y el monitoreo continuo —desde un termostato en una habitación hasta el funcionamiento de los grandes altos hornos, el sistema ABS de un coche o los omnipresentes sistemas de cámaras de vigilancia de circuito cerrado en las ciudades—, junto con la adopción masiva de los ordenadores y la electrónica móvil, son una nueva e importante fuente de consumo eléctrico.

El crecimiento de la producción mundial de electricidad en el siglo xx fue incluso más rápido que el de la extracción de combustibles fósiles, cuya media anual fue del 3% (figura 6.5). En 1900, menos del 2% del combustible se utilizaba para generar electricidad; en 1945 la proporción todavía era inferior al 10%; a finales de siglo, era del 25%. Además, las nuevas centrales hidroeléctricas (creadas a gran escala después de la Primera Guerra Mundial) y nucleares (a partir de 1956) ampliaron la generación de electricidad. Como resultado, el suministro mundial de electricidad creció un 11% anual entre 1900 y 1935 y más del 9% anual desde entonces hasta principios de la década de 1970. Después, el ritmo de crecimiento se redujo al 3,5% anual, en buena parte debido a la menor demanda de las economías más ricas y la mejora de las eficiencias de conversión. Las nuevas formas de

generación de electricidad renovable, como la energía solar y la eólica, solo han mostrado avances notables desde finales de la década de 1980.

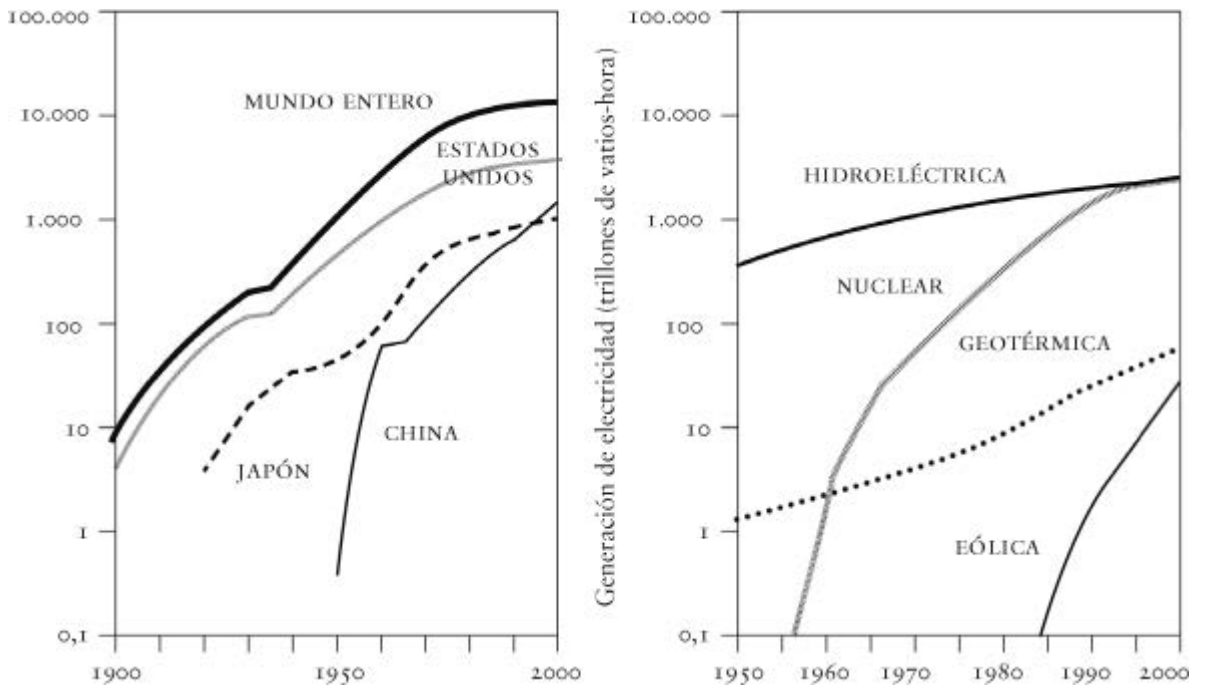


Figura 6.5 La generación mundial de electricidad ha crecido considerablemente más rápido que el suministro de combustibles fósiles. Las grandes potencias han sido siempre las principales productoras y la generación térmica (que ahora se basa en gran medida en el carbón y el gas natural) sigue dominando la producción mundial (izquierda). La hidroelectricidad y la generación nuclear siguen ocupando, respectivamente, el segundo y tercer lugar, mientras que la electricidad eólica y solar ha experimentado rápidos avances después de 2000 (derecha). Fuentes: Naciones Unidas (1956), Palgrave Macmillan (2013) y BP (2015).

Ninguna mejora generada por esta nueva potencia ha sido más fundamental que el aumento sustancial de la producción mundial de alimentos, que ha permitido proporcionar una nutrición adecuada a casi el 90% de la población mundial (FAO, 2015b). Ningún cambio ha moldeado más las sociedades modernas que el proceso de industrialización, y ningún nuevo desarrollo ha contribuido más al surgimiento de una civilización globalizada que la evolución del transporte de masas y la enorme expansión de nuestra capacidad para

acumular información y comunicarnos con una libertad e intensidad sin precedentes. Pero estas impresionantes mejoras no se han repartido por igual, y después examinaré en qué medida el crecimiento económico mundial ha favorecido de manera desproporcionada a una minoría de la población mundial, generando además considerables desigualdades intranacionales. Aun así, ha habido muchas mejoras universales.

La energía en la agricultura

Los combustibles fósiles y la electricidad se han convertido en entrantes indispensables para la agricultura moderna. Se utilizan de manera directa para alimentar máquinas e indirecta para construirlas, extraer fertilizantes minerales, sintetizar compuestos nitrogenados y una variedad aún más amplia de agroquímicos protectores (pesticidas, fungicidas, herbicidas), desarrollar nuevas variedades de cultivo y, más recientemente, activar la electrónica utilizada en el ámbito de la agricultura de precisión. Los combustibles fósiles y la electricidad han generado rendimientos más altos y fiables. Han sustituido prácticamente a todos los animales de tiro en los países ricos y reducido enormemente su importancia en los más pobres, de la misma forma que la sustitución de los músculos humanos por motores de combustión interna y motores eléctricos sostuvo la reducción de la mano de obra iniciada por los avances de la agricultura preindustrial.

La contribución de los combustibles fósiles a la agricultura comenzó —de manera indirecta y a muy pequeña escala— en el siglo XVIII, cuando la fundición de hierro pasó del carbón vegetal al coque, luego se expandió con la adopción generalizada de maquinaria de acero durante la segunda mitad del siglo XIX y finalmente alcanzó cotas todavía más altas con la introducción de maquinaria agrícola más grande y potente, bombas de riego y equipos de procesamiento de cultivos y cría de animales durante el siglo XX. Pero el coste energético de la maquinaria representa una fracción de la energía utilizada directamente para hacer funcionar los tractores, las combinadas y

otras cosechadoras, bombear el agua, secar el grano y procesar los cultivos. Debido a su alta eficiencia inherente, los motores diésel han llegado a dominar la mayoría de estos usos, aunque la gasolina y la electricidad también son importantes entrantes de energía.

El uso de motores de combustión interna en maquinaria de campo comenzó en Estados Unidos en la misma década en que los automóviles se convirtieron por fin en un producto básico producido en masa (Dieffenbach y Gray, 1960). La primera fábrica de tractores estadounidense se estableció en 1905; la toma de fuerza para implementos acoplados se introdujo en 1919; y los elevadores de potencia, los motores diésel y los neumáticos de caucho se introdujeron a principios de la década de 1930. Hasta la década de 1950, la mecanización avanzó mucho más despacio en Europa. En los países más poblados de Asia y América Latina no empezó en serio hasta la década de 1960, y el cambio sigue en marcha en muchos países pobres. La mecanización del trabajo de campo ha sido la principal razón del aumento de la productividad laboral y la reducción de la población activa agrícola: un caballo occidental pesado de principios del siglo XX trabajaba a una tasa equivalente al trabajo de al menos seis hombres, pero es que incluso los primeros tractores tenían una potencia equivalente a 15-20 caballos pesados, mientras que los modelos actuales más potentes que trabajan en las praderas canadienses tienen hasta 575 caballos de fuerza (Versátil, 2015).

En el capítulo 3 mostré cómo el aumento de la productividad redujo la mano de obra necesaria para el cultivo de trigo estadounidense de 30 h/t de grano en 1800 a 7 h/t en 1900. En el año 2000, la tasa era de 90 minutos. Inevitablemente, la mano de obra liberada migró a las ciudades, lo que generó una reducción mundial de la población rural y un crecimiento continuo (todavía en curso) de la urbanización (que analizaremos más adelante). Las estadísticas estadounidenses ilustran este proceso. La mano de obra rural del país pasó de representar más del 60% de la población activa en 1850 a menos del 40% en 1900; en 1950 era el 15 % y en 2015, solo el 1,5

% (USDOL, 2015). A modo de comparación, hoy en día la mano de obra agrícola en la Unión Europea es del 5% del total, mientras que en China todavía es del 30%.

Los caballos de tiro estadounidenses alcanzaron un récord de población en 1915, con 21,4 millones de animales, y el número de mulos alcanzó su máximo en 1925 y 1926 con 5,9 millones (USBC, 1975). Durante la segunda década del siglo XX la potencia de tiro total era diez veces mayor que la de todos los tractores existentes juntos; en 1927, las dos fuentes de energía ya representaban la misma potencia; en 1940 el número de animales de tiro se había reducido a la mitad. Pero la mecanización no podría haber liberado tanta mano de obra rural por sí sola. También fueron necesarios mejores rendimientos de cultivo, logrados gracias a nuevas variedades más reactivas a la fertilización, a la aplicación de herbicidas y pesticidas, y a mejoras en la irrigación.

La importancia de un suministro equilibrado de nutrientes vegetales fue formulada por Justus von Liebig (1803-1873) en 1843 y se volvió conocida como la ley del mínimo de Liebig: el nutriente que está menos presente determina el rendimiento de la cosecha. De los tres macronutrientes que existen (elementos necesarios en cantidades relativamente grandes), el nitrógeno, el fósforo y el potasio, los dos últimos no eran difíciles de conseguir. En 1842 John Bennett Lawes (1814-1900) inventó el tratamiento de las rocas de fosfato mediante ácido sulfúrico diluido para producir superfosfato ordinario, lo que condujo al descubrimiento de grandes depósitos de fosfato en Florida (1888) y Marruecos (1913), mientras que la potasa (KCl) se extraía comúnmente en Europa y América del Norte (Smil, 2001).

El desafío era el suministro de nitrógeno, el macronutriente que se requiere en mayores cantidades por unidad de tierra cultivada. Hasta la década de 1890 la única manera de conseguir nitrógeno inorgánico era importar nitratos chilenos (descubiertos en 1809). Entonces comenzaron a recuperarse cantidades relativamente pequeñas de sulfato de amonio en hornos de coque. El costoso proceso para

conseguir cianamida (el coque reacciona con la cal y produce carburo de calcio, cuya combinación con nitrógeno puro produce a su vez cianamida de calcio) se transformó en un negocio por primera vez en Alemania en 1898; y a principios del siglo XX se utilizó un arco eléctrico (el proceso Birkeland-Eyde, 1903) para producir óxido de nitrógeno que después se convertía en ácido nítrico y nitratos. Pero ninguno de estos métodos servía para fijar nitrógeno a gran escala. La perspectiva de alimentar al mundo no cambió fundamentalmente hasta 1909, cuando Fritz Haber (1868-1934) inventó un proceso catalítico de alta presión para sintetizar amoníaco a partir de sus elementos (Smil, 2001; Stoltzenberg, 2004).

La rápida comercialización (hacia 1913) de este proceso tuvo lugar en la fábrica BASF de Ludwigshafen, bajo la dirección de Carl Bosch (1874-1940). Pero el primer uso importante no fue producir fertilizantes, sino munición de nitrato de níquel para fabricar explosivos durante la Primera Guerra Mundial. Antes de la Segunda Guerra Mundial la producción siguió siendo limitada e incluso en 1960 más de un tercio de los agricultores estadounidenses no utilizaban ningún fertilizante sintético (Schlebecker, 1975). La síntesis de amoníaco y la subsiguiente conversión en fertilizantes líquidos y sólidos son procesos que requieren mucha energía, pero los avances técnicos redujeron el coste energético total y permitieron que la aplicación mundial de compuestos nitrogenados alcanzara el equivalente de 100 millones de toneladas de N en 2000, lo que representaba el 80 % de la síntesis total del compuesto (recuadro 6.2, figura 6.6).

Ningún otro uso energético ofrece tal retorno, porque el nitrógeno sintético aumenta el rendimiento de los cultivos: aunque solo consume el 1% de la energía mundial, suministra la mitad de los nutrientes utilizados anualmente por los cultivos de todo el mundo. Como tres cuartas partes de todo el nitrógeno de las proteínas de los alimentos proviene de tierras cultivables, casi el 40% del suministro mundial de

alimentos actual depende del proceso de síntesis de amoníaco de Haber-Bosch.

RECUADRO 6.2

Coste energético de los fertilizantes nitrogenados

El consumo de energía de la síntesis de Haber-Bosch incluye los combustibles y la electricidad utilizados durante el proceso y la energía incorporada en las propias materias primas. El proceso de síntesis de Haber-Bosch basado en el coque que tenía lugar en la primera planta comercial de BASF requería más de 100 GJ/t de NH3 en 1913; antes de la Segunda Guerra Mundial esta cantidad era de 85 GJ/t de NH3. Después de 1950, el uso del gas natural llevó el coste energético a 50-55 GJ/t de NH3. Los compresores centrífugos, el reformado con vapor y la mejora de los catalizadores redujeron el coste hasta 40 GJ/t durante la década de 1970. Y en 2000 la tasa ya era de 30 GJ/t: las mejores fábricas solo consumían 27 GJ/t de NH3, tasa cercana al consumo de energía estequiométrico (20,8 GJ/t) para la síntesis de amoníaco (Kongshaug, 1998; Smil, 2001). Una nueva fábrica estándar alimentada con gas natural consume 30 GJ/t de NH3, un 20% más cuando utiliza fueloil y hasta 48 GJ/t de NH3 si consume carbón (Rafiqul *et al*., 2005; Noelker y Ruether, 2011).

En 2015, el rendimiento medio era de 35 GJ/t; la última tasa corresponde a 43 GJ/t N. Sin embargo, la mayoría de agricultores no emplea amoníaco (que a presión normal es un gas), sino que prefiere líquidos o sólidos, especialmente la urea, que entre los compuestos sólidos que pueden aplicarse fácilmente incluso en campos pequeños es el que tiene la mayor proporción de N (45%). Convertir el amoníaco en urea y envasar y transportar la urea eleva el coste energético total a 55 GJ/t N. Si utilizamos esta tasa como media mundial, en 2015, con 115 Mt N consumidos en la agricultura, la síntesis de los fertilizantes nitrogenados utilizó 6,3 EJ, poco más del 1% de la producción mundial de energía (Smil, 2014b).

Dicho de otra manera: sin la síntesis de Haber-Bosch, para disfrutar de su dieta actual la población mundial tendría que ser un 40% más pequeña. Los países occidentales, que usan la mayoría de su grano como alimento, podrían reducir fácilmente su dependencia del

nitrógeno sintético reduciendo su elevado consumo de carne. Los países pobres más poblados tienen menos opciones. En particular, el nitrógeno sintético representa el 70% de todo el nitrógeno en China. Como más del 70% de las proteínas del país proviene de los cultivos, esto significa que la mitad de todo el nitrógeno de los alimentos de China proviene de fertilizantes sintéticos. Sin ellos, la dieta media se hundiría hasta niveles de casi hambruna, o alternativamente la mitad de la población actual podría mantener el nivel actual de consumo de alimentos.

La extracción de potasa (10 GJ/t K) y fosfatos y la formulación de fertilizantes fosfatados (en total 20 GJ/t P) añadirían otro 10% al total. El coste energético de otros productos químicos de uso agrícola es mucho menor.

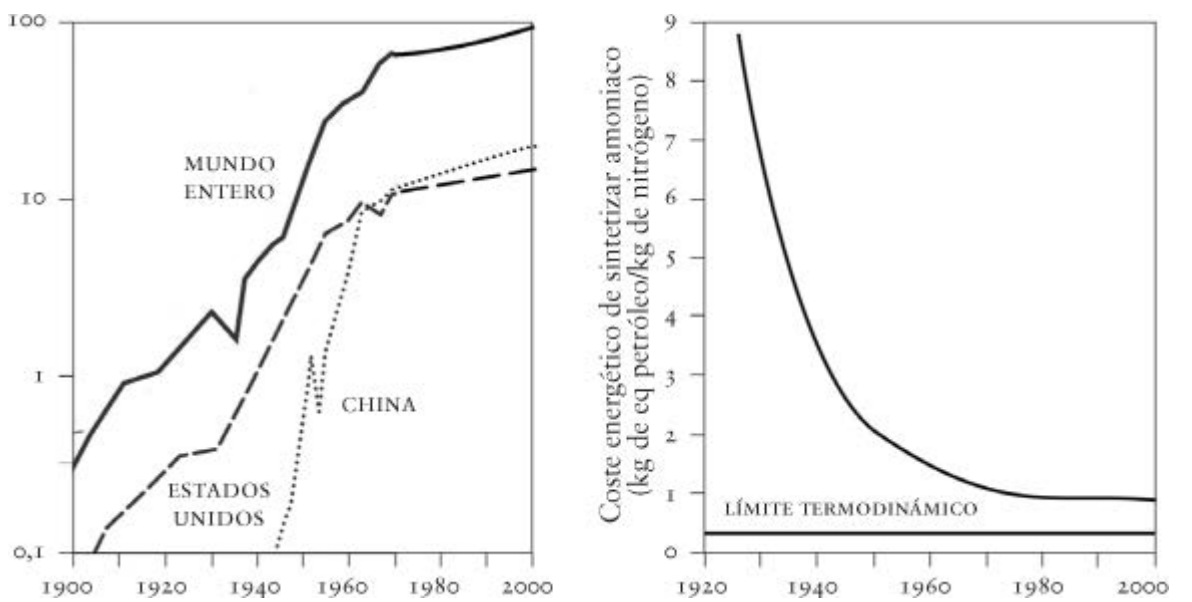


Figura 6.6 El crecimiento exponencial de la producción mundial de fertilizantes nitrogenados (izquierda) ha ido acompañado de una impresionante reducción del coste energético de la síntesis de amoníaco (derecha). Fuentes: Smil (2001, 2015b) y FAO (2015a).

El crecimiento del consumo de fertilizantes después de la Segunda Guerra Mundial vino acompañado de la introducción y expansión del consumo de herbicidas y pesticidas, productos químicos que combaten

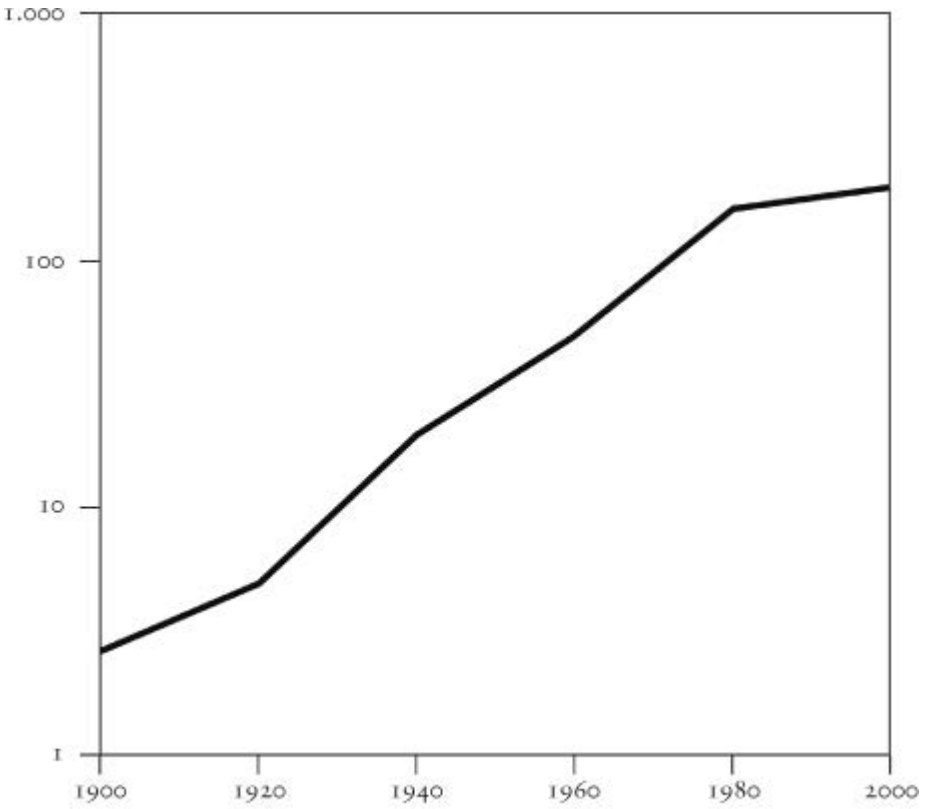
las plagas de malas hierbas, insectos y hongos en los cultivos. El primer herbicida de uso comercial, comercializado en 1945, fue el 2,4-D, que mata muchas plantas de hoja ancha sin causar daños graves en los cultivos. El primer insecticida fue el DDT, lanzado en 1944 (Friedman, 1992). El inventario mundial actual de herbicidas y pesticidas contiene miles de compuestos, en su mayoría derivados de materias primas petroquímicas: sus síntesis específicas son mucho más intensivas en energía que la producción de amoníaco (comúnmente >100 GJ/t y a veces muy por encima de 200 GJ/t), pero las cantidades utilizadas por hectárea son órdenes de magnitud inferiores.

La extensión mundial de tierras agrícolas de regadío se quintuplicó durante el siglo XX, pasando de menos de 50 Mha a más de 250 Mha, hasta alcanzar 275 Mha en 2015 (FAO, 2015a). En términos relativos, esto significa que el 18 % de las tierras de cultivo cosechadas del mundo están irrigadas, la mitad de ellas con agua bombeada principalmente de pozos. El 70% de las tierras irrigadas está en Asia. En los casos en que el riego extrae agua de los acuíferos, el coste energético del bombeo (utilizando principalmente motores diésel o bombas eléctricas) representa invariablemente la parte del león del coste energético total (directo e indirecto) del cultivo de las cosechas. El riego sigue suministrando la mayor parte del agua desviada a los surcos, aunque en muchos países se utilizan aspersores (sobre todo sistemas de pivote central) mucho más eficientes y costosos (Phocaides, 2007).

Solo pueden hacerse cálculos aproximados del crecimiento del consumo directo e indirecto de combustibles fósiles y electricidad en la agricultura moderna. Durante el siglo XX, la población mundial se multiplicó por 3,7, la superficie de bosques creció un 40% y la contribución energética antropogénica se disparó de solo 0,1 EJ a 13 EJ. Como resultado, en 2000 una hectárea media de tierra de cultivo recibía 90 veces más energía que en 1900 (figura 6.7). Y si pasamos de números, podríamos decir con Howard Odum (1971: 115-116) lo siguiente:

> Una generación entera pensó que la capacidad de carga de la tierra era proporcional a la cantidad de tierra cultivada, y que se había encontrado la manera de utilizar la energía del sol de manera más eficiente. Lo cual no es más que una triste mentira, pues el hombre industrial no come patatas producidas con energía solar, sino patatas parcialmente producidas con petróleo.

Esta transformación ha modificado la disponibilidad mundial de alimentos de diferentes maneras. En 1900 la producción mundial bruta de cultivos (sin contar las pérdidas de almacenamiento y distribución) solo generaba un ligero excedente en comparación con el consumo alimentario medio necesario de los seres humanos, lo que significa que mucha gente se alimentaba de manera apenas adecuada o directamente inadecuada, y que la parte de la cosecha que podía utilizarse para alimentar a los animales era mínima. El crecimiento del uso de las energías fósiles permitió que los nuevos cultivos básicos (el maíz híbrido, introducido en la década de 1930, y los cultivos de trigo y arroz de tallo corto, adoptados por primera vez en la década de 1960) alcanzaran su pleno potencial, lo que aumentó el rendimiento de todos los cultivos y dio pie a una sextuplicación general de la energía alimentaria cosechada (Smil, 2000b, 2008; figura 6.7)


1.000
100
10
1
1900
1920
1940
1960
1980
2000

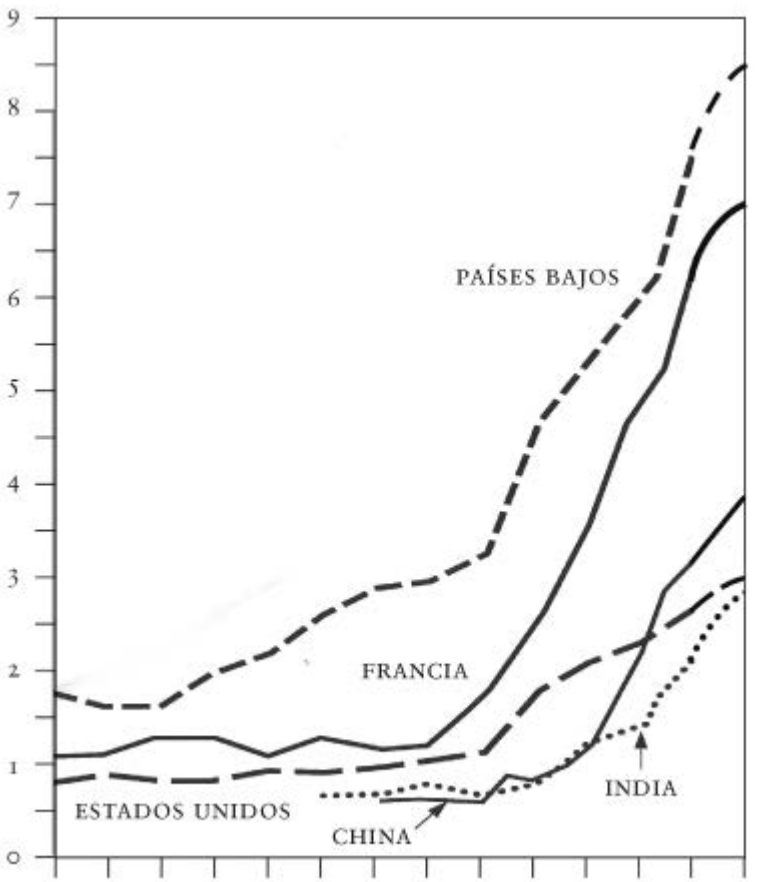

9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
PAÍSES BAJOS
FRANCIA
INDIA
ESTADOS UNIDOS
CHINA

Figura 6.7 Contribución total (directa e indirecta) de las energías fósiles a la agricultura moderna (arriba) y cosecha total y crecimiento del rendimiento del trigo (derecha). Creado con datos de Smil (2008b), Palgrave Macmillan (2013) y FAO (2015a).

A principios del siglo XXI, la cosecha mundial proporcionaba un suministro diario medio (para una población casi cuatro veces mayor que en 1900) de 2.800 kcal/cápita, suministro más que suficiente si se repartiera de forma equitativa (Smil, 2008a). El problema del 12% de la población mundial que todavía está subalimentada es el acceso limitado a los alimentos, no su disponibilidad, mientras que el suministro de alimentos en los países ricos excede ahora en un 75% las necesidades reales de consumo, lo que genera un enorme desperdicio de alimentos (al menos el 30-40% de todos los alimentos vendidos al por menor) y elevados niveles de sobrepeso y obesidad (Smil, 2013a). Además, los animales domésticos consumen mucho grano (50-60% del total en los países ricos). Los pollos son los convertidores más eficientes de pienso (tres unidades de pienso concentrado por unidad de carne); la relación pienso/carne es de 9 para el cerdo; y en el caso del ganado vacuno alimentado con grano, de 25.

La diferencia de conversión también depende de la relación entre carne consumida y peso del animal en vida: 0,65 para el pollo, 0,53 para el cerdo y solo 0,38 para el ganado vacuno (Smil, 2013d). Pero la inversión energética que supone la producción de carne (y leche) tiene su recompensa nutricional: el creciente consumo de alimentos de origen animal es la causa eficiente de que existan dietas ricas en proteínas en todos los países ricos (evidente en el crecimiento de la altura de la gente) y ha asegurado una nutrición media adecuada incluso en la mayoría de los países pobres más poblados del mundo. Lo más notable es que el contenido energético de la dieta media per cápita en China es ahora de 3.000 kcal/día, un 10% superior a la media japonesa (FAO, 2015a).

Industrialización

La industrialización requirió numerosos y grandes cambios relacionados entre sí (Blumer, 1990) a lo largo de todo su proceso de desarrollo. De lejos, el cambio más importante en las fábricas fue la sustitución de sistemas centrales que transmitían la fuerza de las máquinas de vapor mediante correas de cuero y ejes de transmisión por motores eléctricos capaces de accionar máquinas individuales y permitir un control preciso e independiente. Pero incluso el impacto de esta gran transformación hubiera sido limitado si no hubieran existido herramientas de alta velocidad y aceros de mejor calidad para producir mejores máquinas y componentes acabados. Como ya se ha señalado, la intensificación del comercio internacional no se habría producido sin nuevas y poderosas fuentes de energía, cuyo desarrollo a su vez dependía no solo del progreso del diseño técnico de las máquinas, sino también de la disponibilidad de enormes cantidades de nuevos combustibles líquidos derivados de la extracción y refinación del petróleo.

De igual modo, la progresiva concentración de la producción de máquinas en fábricas jerarquizadas exigió ubicar a los trabajadores cerca de dichos establecimientos (de ahí los nuevos modelos de urbanización) y desarrollar nuevas aptitudes y ocupaciones (de ahí una expansión sin precedentes de la educación técnica y la formación de aprendices). La economía monetaria y la movilidad de la mano de obra y el capital establecieron nuevas relaciones contractuales que fomentaron el crecimiento de la migración y la banca. La producción en masa y el bajo coste unitario crearon nuevos grandes mercados basados en el transporte y la distribución fiables y baratos.

Y, contrariamente a lo que suele pensarse, la creciente disponibilidad de calor derivado del carbón y la energía mecánica producida por motores de vapor no fue necesaria para que estos cambios tan complejos se pusieran en marcha. El sistema de talleres de trabajo (*putting-out system*), basado en mano de obra barata proveniente del campo y que produjo tanto para el mercado nacional

como para el internacional, funcionó durante generaciones antes del comienzo de la industrialización del carbón (Mendels, 1972; Clarkson, 1985; Hudson, 1990). Esta protoindustrialización tuvo una importancia considerable no solo en diferentes regiones de Europa (Ulster, los montes Cotswold, Picardía, Westfalia, Sajonia, Silesia y muchas más), sino también en China durante las dinastías chinas Ming y Qing, en Japón durante el shogunato Tokugawa, y en partes de la India.

Un ejemplo notable es la carburación del hierro forjado para producir acero *wootz* indio, cuya transformación más conocida fue la de las espadas damascenas (Mushet, 1804; Egerton, 1896; Feuerbach, 2006). En algunas regiones de la India (Lahore, Amritsar, Agra, Jaipur, Mysore, Malabar, Golconda) se producía a escala casi industrial y se exportaba a Persia y el Imperio turco. Con frecuencia, el siguiente paso en la transición europea del sistema de talleres de trabajo al de fábricas centralizadas fue la industria de mediana-gran escala de productos textiles, parcialmente mecanizada y alimentada con energía hidráulica. En diferentes regiones, las ruedas hidráulicas y las turbinas industriales lograron competir con éxito con las máquinas de vapor durante décadas.

El consumo masivo tampoco fue una verdadera novedad. Tendemos a pensar en el materialismo como una consecuencia de la industrialización, pero en algunas regiones de Europa occidental, especialmente los Países Bajos y Francia, fue una fuerza social importante durante los siglos XV y XVI (Mukerji, 1981; Roche, 2000). Del mismo modo, durante el shogunato Tokugawa (1603-1868), los habitantes más ricos de las ciudades, y especialmente de Edo, la capital del país, disfrutaron de formas de ocio que iban desde los libros ilustrados (*ehon*) hasta el comer fuera (el sushi se hizo popular en esa época), pasando por las obras de teatro y las colecciones de estampados coloridos (*ukiyoe*) de paisajes y actores (Sheldon, 1958; Nishiyama y Groemer, 1997). El gusto y las aspiraciones de cada vez más gente rica proporcionaron un importante impulso cultural a la

industrialización. Buscaban poseer bienes que iban desde mundanas baterías de cocina hasta especias exóticas y productos textiles de lujo; desde fascinantes mapas grabados hasta delicados servicios de té.

La expresión «revolución industrial» es tan atractiva y natural para la gente de nuestro tiempo como engañosa. La industrialización fue un proceso de progreso gradual y desigual, incluso en regiones que pasaron con bastante rapidez de la manufactura local a la producción centralizada y a gran escala para la exportación. La sincronización falsamente precisa de estos cambios (Rostow, 1965) ignora la complejidad y la verdadera naturaleza evolutiva del proceso. Sus comienzos en Inglaterra deberían remontarse al menos hasta finales del siglo XVI, mientras que su pleno desarrollo en Reino Unido no se produjo hasta poco antes de 1850 (Clapham, 1926; Ashton, 1948). Incluso en esa época, el número de artesanos tradicionales superaba con creces al de obreros de fábricas maquinizadas: el censo de 1851 muestra que por aquel entonces en Reino Unido todavía había más zapateros que mineros de carbón (Cameron, 1985).

Considerar el proceso de industrialización mundial a gran escala como un conjunto de réplicas del desarrollo británico (Landes, 1969) no es menos engañoso. Incluso Bélgica, que seguía de cerca el proceso británico, recorrió un camino distinto (allí la metalurgia fue mucho más importante y la industria textil, mucho menos). En resumen, las peculiaridades nacionales hicieron que las pautas de industrialización estuvieran lejos de ser uniformes. Francia hizo mucho énfasis en la energía hidráulica, Estados Unidos y Rusia fueron muy dependientes de la madera, y en Japón la artesanía de calidad fue fundamental. Inicialmente, el carbón y el vapor no causaron ninguna revolución. Con el tiempo, proporcionaron calor y energía mecánica en cantidades y con una fiabilidad nunca vistas antes. La industrialización pudo entonces crecer y acelerarse al mismo tiempo, conduciendo finalmente a un consumo cada vez mayor de energías fósiles.

La minería de carbón no era necesaria para la expansión industrial, pero desde luego fue crítica para acelerarla. La

comparación entre Bélgica y los Países Bajos ilustra este punto. La sociedad holandesa, muy urbanizada, con excelentes medios de transporte y una capacidad comercial y financiera relativamente avanzada, quedó rezagada respecto de Bélgica, rica en carbón pero por lo demás más pobre. De hecho, Bélgica se convirtió en el país continental más industrializado de la Europa de mediados del siglo XIX (Mokyr, 1976). Otras regiones europeas con economías basadas en el carbón y que despegaron pronto fueron la región Rin-Ruhr, Bohemia y Moravia en el Imperio de los Habsburgo, y la Silesia prusiana y austriaca.

Esta pauta se repitió más allá de Europa occidental y central. En Estados Unidos, Pensilvania y su antracita de elevada calidad y Ohio y su excelente carbón bituminoso emergieron como primeros líderes (Eavenson, 1942). En la Rusia anterior a la Primera Guerra Mundial, el descubrimiento durante la década de 1870 de los ricos depósitos de carbón de Donetsk, en Ucrania, y el desarrollo de los campos petrolíferos de Bakú dieron lugar a una rápida expansión industrial posterior (Falkus, 1972). En Japón, la carrera hacia la modernidad durante la era Meiji fue impulsada por el carbón del norte de Kyushu. La primera central integrada moderna de hierro y acero del país comenzó a funcionar 48 años después de la apertura del país al mundo, en 1901, con la puesta en marcha del alto horno Higashida nº 1 de la Fundidora Estatal Yawata (hoy Nippon Steel Corporation) en el norte de Kyushu (Yonekura, 1994). El mayor imperio comercial de la India creció a partir del alto horno de J. Tata utilizando coque de Bihari, en Jamshedpur, a partir de 1911 (Tata Steel, 2011).

Gracias a la energía del carbón y el vapor, los fabricantes tradicionales pudieron producir mayores volúmenes de productos de buena calidad a precios más bajos, condición previa necesaria para el consumo de masas. La disponibilidad de energía mecánica barata y fiable también permitió utilizar máquinas cada vez más sofisticadas. A su vez, esto generó diseños más complejos y una mayor especialización en la fabricación de piezas, herramientas y máquinas. Surgieron

nuevas industrias alimentadas por carbón, coque y vapor para abastecer a los mercados nacionales e internacionales con una rapidez sin precedentes. La fabricación de calderas y tuberías de alta presión comenzó después de 1810. La producción de rieles y locomotoras y vagones de ferrocarril creció muy deprisa después de 1830, igual que la fabricación de turbinas de agua y hélices después de 1840. Los cascos de barco de hierro y los cables telegráficos submarinos generaron nuevos y grandes mercados después de 1850, y la posibilidad de fabricar acero barato —en convertidores Thomas-Bessemer después de 1856 y en hornos Martin-Siemens durante la década de 1860 (Bessemer, 1905; Smil, 2016)— generó grandes mercados para productos varios: desde cubiertos hasta rieles, pasando por arados y vigas de construcción.

El aumento del consumo de combustible y el reemplazo de herramientas por máquinas transformaron los músculos humanos en una fuente de energía marginal. La mano de obra humana fue dedicándose al apoyo, el control y la gestión del proceso productivo. Esta tendencia queda claramente ilustrada por el análisis del censo y la encuesta de población activa de Inglaterra y Gales durante un siglo y medio (Stewart, De y Cole, 2015). En 1871, el 24% de los trabajadores utilizaba su «fuerza muscular» (en la agricultura, la construcción y la industria) y solo el 1% tenía un trabajo de «cuidado» (en salud y enseñanza, cuidado de niños y el hogar y bienestar); en 2011, el trabajo de «cuidado» representaba el 12% y el físico —que además hoy suele estar relacionado con tareas mecanizadas, como en el caso de la limpieza y el servicio doméstico y los trabajos de línea de ensamble—, solo el 8%.

Aunque la importancia de la mano de obra disminuyera, el estudio sistemático de tareas individuales y procesos completos de fábrica demostró que la productividad laboral podía crecer enormemente optimizando, reorganizando y estandarizando las actividades musculares. Frederick Winslow Taylor (1856-1915) fue un pionero en este ámbito. Tras pasar 26 años, desde 1880, cuantificando todas las

variables clave implicadas en el corte de acero, redujo sus hallazgos a un simple conjunto de reglas y cálculos y sacó conclusiones generales de gestión de la eficiencia en *Los principios de la administración científica* (Taylor, 1911); un siglo más tarde, sus lecciones todavía guían a algunos de los fabricantes de productos de consumo más exitosos del mundo (recuadro 6.3).

El eclipse de las máquinas de vapor por la electrificación inauguró una etapa radicalmente nueva de la industrialización. La electricidad es una energía increíble, y no solo comparada con el vapor. Es la única forma de energía que combina una accesibilidad total e instantánea con la versatilidad de servir de manera fiable para cualquier actividad (excepto la aviación). Puede convertirse en luz, calor, movimiento o potencial químico utilizando un simple interruptor. Su flujo puede ajustarse muy fácilmente, lo cual genera una precisión, una velocidad y una capacidad de control de procesos imposibles hasta entonces. Además, para el consumidor final es una energía limpia y silenciosa. Y una vez instalado el cableado apropiado, puede acomodar un número casi infinito de usos crecientes o cambiantes sin que sea necesario ningún tipo de inventario.

Todos estos atributos conllevaron que la electrificación de la industria fuera un cambio verdaderamente revolucionario. Después de todo, las máquinas de vapor que reemplazaron a las ruedas hidráulicas no transformaron la forma de transmitir energía mecánica. Por eso no afectaron demasiado al aspecto general de las fábricas, que siguieron estando atestadas de ejes de transmisión (*mainline shafts*) unidos a ejes contrarios paralelos (*parallel countershafts*) que transferían el movimiento por medio de correas a las máquinas individuales (figura 6.8). La interrupción del movimiento de la máquina de vapor central (ya fuera por falta de agua o un fallo del motor) o cualquier fallo de transmisión (como un problema en el eje de transmisión o una correa salida) deshabilitaba todo el sistema. Este sistema también generaba grandes pérdidas de energía por fricción y

solo permitía un control limitado de la potencia que acababa llegando a los lugares de trabajo de cada persona.

RECUADRO 6.3

Desde los experimentos con el corte de acero hasta la exportación de automóviles en Japón

Frederick Winslow Taylor estaba preocupado por el despilfarro de trabajo, es decir, el uso ineficiente de la energía —esos «movimientos torpes, ineficientes o mal dirigidos de las personas» que «no dejan nada visible o tangible tras de sí»—, y abogaba por optimizar el esfuerzo físico. Sus críticos pensaban que esto no era más que una forma estresante de explotación (Copley, 1923; Kanigel, 1997), pero lo cierto es que la investigación de Taylor se basaba en la comprensión de las reglas energéticas del trabajo. Se opuso al esfuerzo excesivo (si «el hombre está demasiado cansado por su trabajo, entonces la tarea se ha fijado erróneamente, lo cual está en las antípodas del objeto de la gestión científica») y subrayó que el conocimiento de los gestores está «muy lejos del conocimiento y la destreza combinados de los trabajadores que están bajo sus órdenes», razón por la cual reclamó «la cooperación íntima entre gestores y trabajadores» (Taylor, 1911: 115).

Inicialmente, las recomendaciones de Taylor fueron rechazadas (Bethlehem Steel lo despidió en 1901), pero con el tiempo sus *Principios de gestión científica* se convirtieron en una guía clave para la fabricación en todo el mundo. En particular, el éxito mundial de las empresas japonesas se ha basado en un esfuerzo continuo por eliminar la mano de obra improductiva y el exceso de carga de trabajo, eliminar los ritmos de trabajo desiguales, alentar a los trabajadores a participar en la mejora del proceso de producción mediante sugerencias y minimizar la confrontación entre trabajadores y dirección. El famoso sistema de producción de Toyota —el trío *muda mura muri* (reducir las actividades sin valor añadido, los ritmos de producción inestables y la carga de trabajo excesiva)— es puro taylorismo (Ohno, 1988; Smil, 2006).

Los primeros motores eléctricos accionaban ejes (*shafts*) más cortos para conjuntos de máquinas más pequeños. Después de 1900 el accionamiento unitario se convirtió en la norma rápidamente. Entre

1899 y 1929 la potencia mecánica total instalada en las fábricas americanas se cuadruplicó, mientras que la capacidad de los motores eléctricos industriales creció casi 60 veces y alcanzó el 82% de la potencia total disponible, en comparación con menos del 5% a finales del siglo XIX (USBC, 1954; Schurr *et al*., 1990). Posteriormente, la proporción de energía eléctrica fue relativamente estable: la sustitución de las máquinas de vapor y las ruedas hidráulicas por motores terminó solo treinta años después de su inicio, a finales de la década de 1890. Este tipo de suministro de energía, fiable y eficiente, hizo mucho más que eliminar el desorden que había en el techo de las fábricas, así como el inevitable ruido y el riesgo de accidentes que implicaba. La desaparición de los ejes de transmisión (*shaft drive*) liberó espacio para la instalación de una mejor iluminación y ventilación y también posibilitó diseños de planta flexibles y una fácil expansión de la capacidad. La elevada eficiencia de los motores eléctricos, combinada con un control preciso, flexible e individual de la potencia en un mejor entorno de trabajo, trajo consigo una productividad laboral mucho mayor.

La electrificación también significó el nacimiento de grandes industrias especializadas. Primero fue la fabricación de bombillas, dinamos y cables (después de 1880) y turbinas de vapor y agua (después de 1890). Las calderas de alta presión que queman combustible pulverizado se introdujeron después de 1920; la construcción de gigantescas presas mediante grandes cantidades de hormigón armado comenzó una década más tarde. La instalación generalizada de sistemas de control de la contaminación atmosférica se produjo después de 1950, y las primeras centrales nucleares entraron en funcionamiento antes de 1960. La creciente demanda de electricidad también estimuló la exploración geofísica, la extracción de combustible y el transporte. También fue necesaria una gran cantidad de investigación básica sobre las propiedades de los materiales, la ingeniería del control y la automatización para producir mejores aceros, otros metales y sus aleaciones, y aumentar la fiabilidad y vida

útil de las costosas instalaciones de extracción, transporte y conversión de energía.

Figura 6.8 Interior del taller de torneado principal del molino de bobinas de Stott Park en Finthswaite, Lakeside, Cumbria, que muestra la típica disposición de correas aéreas transmitiendo la potencia de una gran máquina de vapor a máquinas de uso individual. La fábrica producía bobinas de madera para la industria del hilado y el tejido de Lancashire (Corbis).

La disponibilidad de electricidad fiable y barata transformó toda la actividad industrial. El efecto más importante en el proceso de fabricación fue la adopción generalizada de líneas de ensamblaje (Nye, 2013). Su clásica (y ahora anticuada) rígida variedad fordista estaba basada en un transportador móvil introducido en 1913. El tipo moderno y flexible japonés se basa en el método justo a tiempo (*just-in-time*) de fabricación de piezas y en trabajadores capaces de realizar

diferentes tareas. Este sistema, creado en las fábricas de Toyota, combinaba elementos de las prácticas estadounidenses con un enfoque e ideas propios (Fujimoto, 1999). El sistema de producción de Toyota (*kaizen*) estaba fundamentado en la mejora continua de los productos y la atención prestada al mejor control de calidad posible. Una vez más, el punto en común fundamental entre todas estas metodologías de trabajo es la lucha contra el desperdicio de energía.

La disponibilidad de electricidad barata también ha creado nuevas industrias de producción de metales y electroquímicas. La electricidad permitió la fundición a gran escala de aluminio mediante la reducción electrolítica de la alúmina (Al_2O_3) disuelta en un electrolito, principalmente criolita (Na_3AlF_6). Desde los años 1930 la electricidad ha sido indispensable para la síntesis y la conformación de una variedad cada vez mayor de plásticos y más recientemente para la introducción de una nueva clase de materiales compuestos (sobre todo fibras de carbono). El coste energético de estos materiales es tres veces mayor que el del aluminio, y su mayor uso comercial ha sido el de sustituir las aleaciones de aluminio en la construcción de aviones comerciales: el últimoBoeing 787 está compuesto de fibra de carbono en un 80%.

Mientras que en muchos casos el acero ha sido sustituido por nuevos materiales ligeros, la fabricación de acero en sí utiliza de manera cada vez más frecuente hornos de arco eléctrico. Los nuevos aceros, más ligeros y fuertes, han sido útiles en muchos contextos, especialmente en la industria automovilística (Smil, 2016). Antes de terminar esta lista, que podría ocupar páginas enteras, debo subrayar que sin electricidad no habría micromaquinado a gran escala produciendo piezas con tolerancias ridículas para aplicaciones tan normales hoy como la fabricación de motores de reacción o dispositivos de diagnóstico médico, y, por supuesto, no habría ni controles electrónicos precisos ni existirían los ordenadores y los miles de millones de dispositivos de telecomunicación que se utilizan actualmente en todo el mundo.

Aunque la participación de la industria manufacturera (como porcentaje de la fuerza laboral o el PIB) ha ido disminuyendo constantemente en prácticamente todos los países ricos —a principios de 2015 era del 10% de los trabajadores y el 12% del PIB en Estados Unidos (USDOL, 2015)—, la industrialización continúa, si bien su configuración ha cambiado. Los flujos masivos de energía y materiales siguen siendo su principal fundamento; los metales también siguen siendo los materiales industriales por excelencia; y el hierro, que ahora se utiliza principalmente en muchos tipos de acero, mantiene su dominio sobre los demás metales. En 2014 la producción de acero fue 20 veces mayor que la producción total combinada de los cuatro principales metales no ferrosos: aluminio, cobre, zinc y plomo (USGS, 2015). La fundición de mineral de hierro en altos hornos, seguida de la fabricación de acero en hornos de oxígeno básico y el uso de acero reciclado en hornos de arco eléctrico dominan el mundo de la producción de acero. El increíble crecimiento de la producción de acero habría sido imposible sin altos hornos mucho más grandes y eficientes (recuadro 6.4, figura 6.9).

Del mismo modo, las técnicas de fabricación de acero se han vuelto más eficientes no solo porque consumen menos energía, sino también por la mejora del rendimiento (Takamatsu *et al.*, 2014). Los primeros convertidores Thomas-Bessemer transformaron primero menos del 60% y luego más del 70% del hierro en acero. Los hornos de solera abierta acabaron convirtiendo un 80%, mientras que los mejores hornos de oxígeno básico actuales, introducidos por primera vez en la década de 1950, tienen un rendimiento de hasta el 95% y los hornos de arco eléctrico de hasta el 97%. Los hornos de arco eléctrico actuales consumen menos de 350 kWh/t de acero, en comparación con más de 700 kWh/t en 1950; además, esta mejora ha ido de la mano de una reducción de emisiones: entre 1960 y 2010, las emisiones de CO_2 en Estados Unidos (por tonelada de metal caliente) se redujeron en un 50% y las de polvo en un 98% (Smil, 2016). El coste energético del acero ha bajado aún más por la fundición continua del metal caliente.

Esta técnica sustituyó a la producción tradicional de lingotes, que requería recalentar antes de procesar.

RECUADRO 6.4

Crecimiento y balances de masa y energía de los altos hornos

Pocas estructuras de producción medievales son tan importantes para el funcionamiento de la civilización moderna como los altos hornos. Como se ha señalado en el capítulo 5, el rediseño de Bell de 1840 quintuplicó su volumen interno, llevándolo a 250 m^3. En 1880 el horno más grande del mundo superó los 500 m^3; en 1950 alcanzó 1.500 m^3 y en 2015 el volumen interno récord se situó en 5.500-6.000 m^3 (Smil, 2016). La mejora de productividad resultante hizo que la producción de metal caliente pasara de 50 t/día en 1840 a más de 400 t/día en 1900. La marca de 1.000 t/día se alcanzó antes de la Segunda Guerra Mundial, y los hornos actuales más grandes producen unas 15.000 t/día. El récord mundial lo tiene el horno Pohang 4 de POSCO, en Corea del Sur: unas 17.000 t/día.

Los flujos de masa y energía necesarios para el funcionamiento de los grandes altos hornos y los hornos de oxígeno básico asociados son prodigiosos (Geerdes, Toxopeus y Van der Vliet, 2009; Smil, 2016). Un alto horno que produce 10.000 t/día de hierro y abastece a un horno de oxígeno básico adyacente necesita 5,11 Mt de mineral, 2,92 Mt de carbón, 1,09 Mt de materiales de flujo y 0,5 Mt de chatarra de acero. Así, una gran acería integrada recibe cada año unas 10 Mt de materiales. Los hornos modernos producen metal caliente continuamente durante 15-20 años antes de que su interior de ladrillos refractarios y su solera de carbón se vuelvan a revestir. Esta mejora productiva ha ido acompañada de una reducción del consumo específico de coque. En 1900 el consumo típico de coque era de 1-1,5 t/t de metal caliente; en 2010 era de 370 kg/t en Japón y 340 kg/t en Alemania (Lüngen, 2013). Así, el coste energético de la fundición de hierro alimentada por coque viene reduciéndose de 275 GJ/t en 1750 a 55 GJ/t en 1900, 30 GJ/t en 1950, y 12-15 GJ/t en 2010.

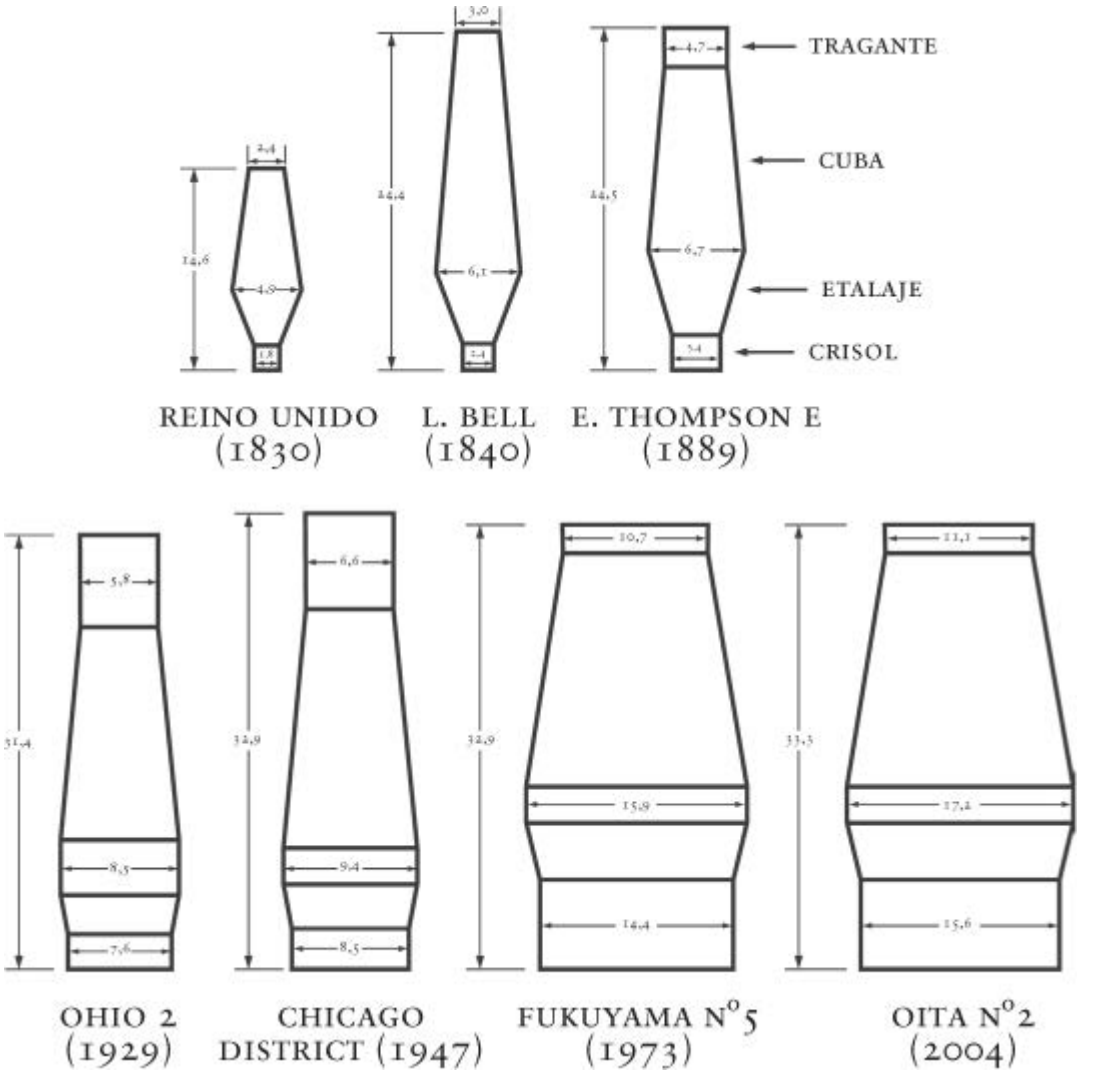


Figura 6.9 Evolución del diseño de los altos hornos, 1830-2004. Las principales tendencias incluyen cubas más altas y anchas, crisoles más grandes y etalajes más bajos y empinados. Los mayores hornos producen ahora más de 15.000 t de metal caliente al día. Fuente: Smil (2016).

El aumento de producción resultante ha sido tan grande que puede medirse en órdenes de magnitud per cápita: en 1850, antes del comienzo de la producción moderna de acero, se producían menos de 100.000 t/año de acero de manera artesanal, es decir, 75 g/año/cápita. En 1900, con 30 Mt, la media mundial fue de 18 kg/cápita; en 2000, con 850 Mt, fue de 140 kg/cápita; y en 2015, con 1,65 Gt, alcanzó 225 kg/cápita, 12 veces la tasa de 1900. Según mis cálculos, en 2013 la producción mundial de hierro y acero requirió 35 EJ de

combustibles y electricidad, menos del 7% de la producción mundial de energía primaria, lo cual lo convierte en el sector industrial que más energía consume del mundo (Smil, 2016). El resto del consumo energético se distribuye como sigue: el 23% para las demás industrias, el 27% para el transporte y el 36% para los usos residenciales y de servicios. Si la intensidad energética del sector no hubiera mejorado desde la década de 1960, en 2015 habría consumido el 16% de la producción mundial de energía primaria, lo cual constituye un ejemplo impresionante de la mejora continua de la eficiencia.

La innovación más importante en el mundo de la metalurgia no ferrosa fue el desarrollo de la fundición de aluminio. Se consiguió aislar aluminio en 1824, pero hasta 1866 no se ideó un proceso viable para su producción a gran escala. Los inventos independientes de Charles M. Hall en Estados Unidos y P. L. T. Héroult en Francia se basaron en la electrólisis del óxido de aluminio. La energía mínima necesaria para separar el metal es más de seis veces mayor que la necesaria para fundir el hierro. Por eso la fundición de aluminio avanzó despacio incluso después de la llegada de la generación de electricidad a gran escala. Durante la década de 1880, el requerimiento específico de electricidad era de más de 50.000 kWh/t de aluminio; en 1990, la subsiguiente mejora constante del proceso Hall-Héroult había reducido esta tasa en más de dos tercios (Smil, 2014b).

El uso del aluminio creció primero con el avance de la aviación. Los fuselajes de metal desplazaron a los de madera y tela a finales de la década de 1920, y luego la demanda aumentó bruscamente durante la Segunda Guerra Mundial para fabricar cazas y bombarderos. Desde 1945 el aluminio y sus aleaciones se han convertido en un sustituto del acero cuando ha sido necesario combinar fuerza y ligereza. Se han utilizado en automóviles, vagones tolva y vehículos espaciales, entre otros, aunque ahora este mercado también se sirve de nuevas aleaciones de acero ligero. Y desde la década de 1950 el titanio ha reemplazado al aluminio en aplicaciones de alta temperatura (sobre

todo en aviones supersónicos). Su producción es al menos tres veces más intensiva en energía que la del aluminio (Smil, 2014b).

Aunque suele pasarse por alto la importancia fundamental de los metales producidos en masa en una sociedad obsesionada por los últimos avances en electrónica, no cabe duda de que la industria moderna ha evolucionado muchísimo gracias a su relación cada vez más estrecha con la electrónica moderna, relación que ha mejorado muchísimo las opciones de diseño, ha introducido controles de precisión y flexibilidad sin precedentes, y ha transformado el marketing, la distribución y el control del rendimiento. Un análisis internacional comparado mostró que en 2005 en Estados Unidos los servicios prestados a la industria por empresas externas representaban el 30% del valor añadido de los productos acabados, con niveles similares (23-29%) en las principales economías de la Unión Europea; y en 2008 las tareas de servicios representaban más de la mitad (53%) del empleo del sector manufacturero en Estados Unidos, el 44-50% en Alemania, Francia y Reino Unido, y el 32% en Japón (Levinson, 2012). Y aunque muchos productos no parecen tan diferentes de sus predecesores, en realidad son híbridos muy distintos (recuadro 6.5).

Los automóviles son solo un ejemplo destacado de industria que ahora piensa que el I+D, el diseño, el marketing y el servicio al cliente no son menos importantes que la producción real de bienes. Aunque el uso específico de energía incorporada (por vehículo, ordenador o lo que sea) haya crecido (debido al uso de materiales más consumidores de energía, un peso mayor o un mejor rendimiento), permanecido estable o disminuido, la cantidad producida ya no es la única preocupación de la industria, que ahora también considera muchas otras cosas, como la apariencia, la calidad o el reconocimiento de marca. Este cambio tiene importantes implicaciones tanto para el consumo de energía futuro como para la estructura de la fuerza laboral, aunque no existe ninguna tendencia simple y unidireccional (véase capítulo 7).

Transporte

Los medios de transporte que funcionan con combustibles fósiles o electricidad comparten una serie de atributos. A diferencia de los medios de transporte de personas y mercancías tradicionales, son mucho más rápidos (y a menudo increíblemente rápidos): decenas de millones de personas cruzan cada año el Atlántico en 6-8 h; hace un siglo el viaje duraba casi seis días (Hugill, 1993) y hace medio milenio la primera travesía duró cinco semanas. Los medios de transporte actuales también son incomparablemente más fiables que los tradicionales: incluso los mejores coches de caballos tirados por los animales más fuertes tenían muchas dificultades para cruzar pasos alpinos por culpa de la ruptura de los ejes, la lesión de los animales y la violencia de algunas tormentas; ahora cientos de vuelos diarios sobrevuelan los Alpes y los trenes los atraviesan a toda velocidad utilizando túneles. Por otro lado, un viaje transatlántico de ida costaba de media unos 75 dólares de la época justo antes de la Primera Guerra Mundial (Dupont, Keeling y Weiss, 2012), es decir, 1.900 dólares en 2015, y casi 4.000 dólares de vuelta. Mucho más que los 1.000 dólares de un vuelo medio (sin descuento) entre Londres y Nueva York hoy.

RECUADRO 6.5

Los coches entendidos como máquinas mecatrónicas

No hay mejor ejemplo de la fusión de componentes mecánicos y electrónicos que un coche actual. En 1977 el Oldsmobile Toronado de General Motors fue el primer coche producido con una unidad de control electrónico (ECU) para gestionar la sincronización de la chispa. Cuatro años más tarde, GM tenía 50.000 líneas de código de software de control de motores en su línea de automóviles domésticos (Madden, 2015). Ahora, incluso los coches más baratos tienen hasta 50 ECU, y algunas marcas de primera calidad (como la clase S de Mercedes-Benz) tienen hasta 100 ECU en red y un software de 100 millones de líneas de código, cantidad que habría que comparar con las 5,7 millones de líneas de código necesarias para operar un F-35 (el caza del

programa Strike Fighter de las Fuerzas Aéreas de Estados Unidos) o las 6,5 millones de líneas de código del Boeing 787, el último modelo de avión comercial de la compañía (Charette, 2009).

La electrónica de los coches es cada vez más compleja, pero comparar líneas de código es engañoso. La principal causa de esta burbuja de software es el gran número de opciones y configuraciones que ofrecen los modelos de lujo, incluyendo las de infoentretenimiento y navegación, que realmente no tienen nada que ver con la motorización; hay una gran cantidad de código reutilizado, autogenerado y redundante. Aun así, la electrónica y el software representan ahora hasta el 40% del coste de los vehículos de primera calidad: los coches han pasado de ser ensamblajes mecánicos a ser híbridos mecatrónicos, y cada adición de una función de control útil —como una advertencia de salida de carril, el frenado automático para evitar una colisión trasera o un diagnóstico avanzado— amplía los requisitos de software y aumenta el coste del vehículo. La tendencia es muy clara, pero los vehículos completamente autónomos no llegarán tan pronto como muchos observadores acríticos creen.

Aunque a principios del siglo XIX se produjeron algunos avances importantes tanto en términos de capacidad y eficiencia unitarias como de aprovechamiento estacionario de energías cinéticas naturales mediante ruedas hidráulicas y molinos de viento, el transporte terrestre, impulsado únicamente por músculos humanos y tracción animal, había cambiado muy poco desde la Antigüedad. Durante milenios, ningún medio de transporte terrestre fue más rápido que un buen caballo. Durante siglos, ningún medio de transporte fue menos cansado que un coche de caballos con una buena amortiguación. En 1800 algunas carreteras estaban bien asfaltadas y muchos coches de caballos estaban bien equipados, pero todas estas diferencias eran de grado, no cualitativas. Las vías férreas revolucionaron la situación en cuestión de años. No solo redujeron las distancias y redefinieron el espacio, sino que generaron una comodidad sin precedentes. La velocidad de una milla por minuto (96 km/h) se alcanzó brevemente por primera vez en una carrera programada en Inglaterra en 1847; ese año también fue el de mayor actividad de construcción de ferrocarriles

en el país, que estableció una densa red de enlaces fiables en tan solo dos generaciones (O'Brien, 1983).

La construcción de ferrocarriles a gran escala, con trenes cada vez más potentes tirados por motores de vapor alimentados con carbón, tuvo lugar en Europa y América del Norte en menos de 80 años: la experimentación comenzó durante la década de 1820 y en la década de 1890 los trenes más rápidos ya alcanzaban más de 100 km/h. Poco después de que fueran introducidos, los vagones de pasajeros dejaron de ser meros rectángulos sobre raíles y se les añadió calefacción y lavabos. Por un precio más alto, los pasajeros también disfrutaban de buena tapicería, servicio de comida de calidad y todo lo necesario para dormir. Trenes cada vez más rápidos y cómodos llevaron no solo a turistas y migrantes a las ciudades, sino también a urbanitas al campo. La recientemente desaparecida Thomas Cook ofreció paquetes de vacaciones en ferrocarril a partir de 1841. Las líneas ferroviarias de cercanías hicieron posible la primera gran ola de suburbanización. Los trenes de carga, cada vez más espaciosos, llevaban recursos voluminosos a industrias aisladas y distribuían sus productos con rapidez.

La longitud total de los ferrocarriles británicos fue superada muy pronto por la de los ferrocarriles estadounidenses, que nacieron en 1834 en Filadelfia. En 1860 Estados Unidos tenía 48.000 km de vías, tres veces el total de Reino Unido. En 1900 la diferencia era diez veces mayor. El primer enlace transcontinental llegó en 1869; a finales de siglo había cuatro líneas más de este tipo (Hubbard, 1981). En Rusia el desarrollo también fue bastante rápido. En 1860 se tendieron solo 2.000 km de vías, pero el total alcanzó más de 30.000 en 1890 y casi 70.000 km en 1913 (Falkus, 1972). El enlace transcontinental de Siberia a Vladivostok, iniciado en 1891, no estuvo terminado hasta 1917. Cuando los británicos se retiraron de la India en 1947, dejaron atrás 54.000 km de vías (69.000 km en todo el subcontinente). Ningún otro país del continente asiático construyó una red ferroviaria importante antes de la Segunda Guerra Mundial.

Desde el final de la Segunda Guerra Mundial, la competencia de automóviles, autobuses y aviones redujo la importancia relativa de los ferrocarriles en la mayoría de países industrializados, aunque durante la segunda mitad del siglo XX la Unión Soviética, Brasil, Irak y Argelia fueron vigorosos constructores de nuevas líneas, mientras que China fue el líder en Asia con más de 30.000 km de vías añadidas entre 1950 y 1990. Con todo, la innovación más exitosa del periodo posterior a la Segunda Guerra Mundial ha sido el tren eléctrico rápido de larga distancia. El Shinkansen japonés, que fue inaugurado entre Tokio y Osaka en 1964, alcanzó un récord de 250 km/h, y los últimos trenes japoneses (*nozomi*) van a 300 km/h (Smil, 2014a; figura 6.10).

Figura 6.10 La serie Shinkansen N700 en la estación de Kioto en 2014, en el 50 aniversario de funcionamiento sin accidentes de los trenes rápidos japoneses en la línea de Tokaido. Fotografía del autor.

Los *Trains à Grande Vitesse* (TGV) franceses funcionan desde 1983. El viaje programado más rápido promedia 280 km/h. También existen ahora enlaces rápidos similares en España (AVE), Italia (Frecciarossa) y Alemania (Intercity). Entre tanto, China se ha convertido en el nuevo líder mundial de ferrocarriles de alta velocidad: en 2014 tenía 16.000 km de vía dedicada (Xinhua, 2015). Por el contrario, el solitario Acela estadounidense (Boston-Washington, con poco más de 100 km/h de media) ni siquiera se califica como tren moderno de alta velocidad.

Si tomamos como punto de partida la introducción de los primeros motores de gasolina a finales de la década de 1880, entonces la segunda revolución del transporte terrestre —el progreso de los vehículos de carretera impulsados por motores de combustión interna — no fue más deprisa. En Estados Unidos y los países más ricos de Europa se interrumpió dos veces por las guerras mundiales. Y mientras que en Estados Unidos la tasa de automóviles en propiedad ya era muy elevada a finales de la década de 1920, hubo que esperar a la década de 1960 para alcanzar niveles parecidos en Europa y Japón y a los años 2000 para llegar al mismo punto en China, que debido a su enorme población y la inversión masiva y muy rápida en nuevas fábricas superó el total de ventas de automóviles de Estados Unidos en 2010. Ese año había 870 millones de coches y más de mil millones de vehículos de carretera de todo tipo en todo el mundo (figura 6.11).

Los cambios económicos, sociales y ambientales provocados por los automóviles figuran entre las transformaciones más profundas de la era moderna (Ling, 1990; Womack, Jones y Roos, 1991; Eckermann, 2001; Maxton y Wormald, 2004). En un país tras otro (primero en Estados Unidos a mediados de la década de 1920), la fabricación de automóviles se ha convertido en la principal industria en términos de valor de producto. Los automóviles también se han convertido en importantes productos básicos del comercio internacional. Sus exportaciones desde Alemania (después de 1960) y aún más desde Japón (después de 1970) han sido muy beneficiosas

para ambos países durante décadas. Grandes segmentos de otras industrias —sobre todo del acero, el caucho, el vidrio, los plásticos y el refinamiento de petróleo— dependen de la fabricación y la conducción de automóviles. La construcción de autopistas ha implicado una participación masiva de los Estados, lo que ha dado lugar a enormes inversiones acumulativas de capital. Las *Autobahnen* de Hitler de la década de 1930 precedieron al sistema de autopistas interestatales de Eisenhower por una generación (empezó en 1956 y hoy acumula unos 77.000 km), y este último sistema ha sido superado con creces por el sistema de autopistas nacionales de China, que en 2015 alcanzó 112.000 km.

Ciertamente, el impacto más obvio generado por el automóvil ha sido el reordenamiento mundial de las ciudades a través de la proliferación de autopistas y parkings y la destrucción de barrios. Cuando el espacio lo ha permitido, también se ha producido un rápido aumento de la suburbanización (y en Estados Unidos también de la exurbanización) y cambios en la ubicación y las formas del comercio y los servicios. El impacto social ha sido aún mayor. La propiedad de automóviles ha sido una parte importante del enriquecimiento de la población, y algunos modelos baratos permitieron que este nuevo tipo de propiedad masiva disfrutara de una longevidad asombrosa (Siuru, 1989). El primero fue el Modelo T de Ford, cuyo precio bajó hasta 265 dólares en 1923 y cuya producción duró 19 años (McCalley, 1994). Otros modelos notables fueron el Austin Seven, el Morris Minor, el Citroën 2CV, el Renault 4CV, el Fiat Topolino y —el más popular de todos— el Volkswagen inspirado en Hitler de Ferdinand Porsche (recuadro 6.6).

La libertad de viajar ha tenido enormes efectos en la movilidad residencial y profesional. Este efecto ha demostrado ser altamente adictivo. La analogía de Boulding (1974), que compara el coche con un corcel mecánico que convierte al conductor en un caballero con la movilidad de un aristócrata que mira por encima del hombro a los campesinos pedestres, no es demasiado exagerada. En 2010 había solo

1,25 personas por vehículo motorizado (incluidos camiones y autobuses) en Estados Unidos. En Alemania y Japón la tasa era de 1,7 (Banco Mundial, 2015b). Esta adicción generalizada a la movilidad bajo demanda hace difícil abandonar el hábito: tras una caída inducida por la crisis de 2008 y la posterior recesión, entre 2009 y 2011, la venta de automóviles en Estados Unidos alcanzó el nivel casi récord de 16,5 millones de unidades en 2015.

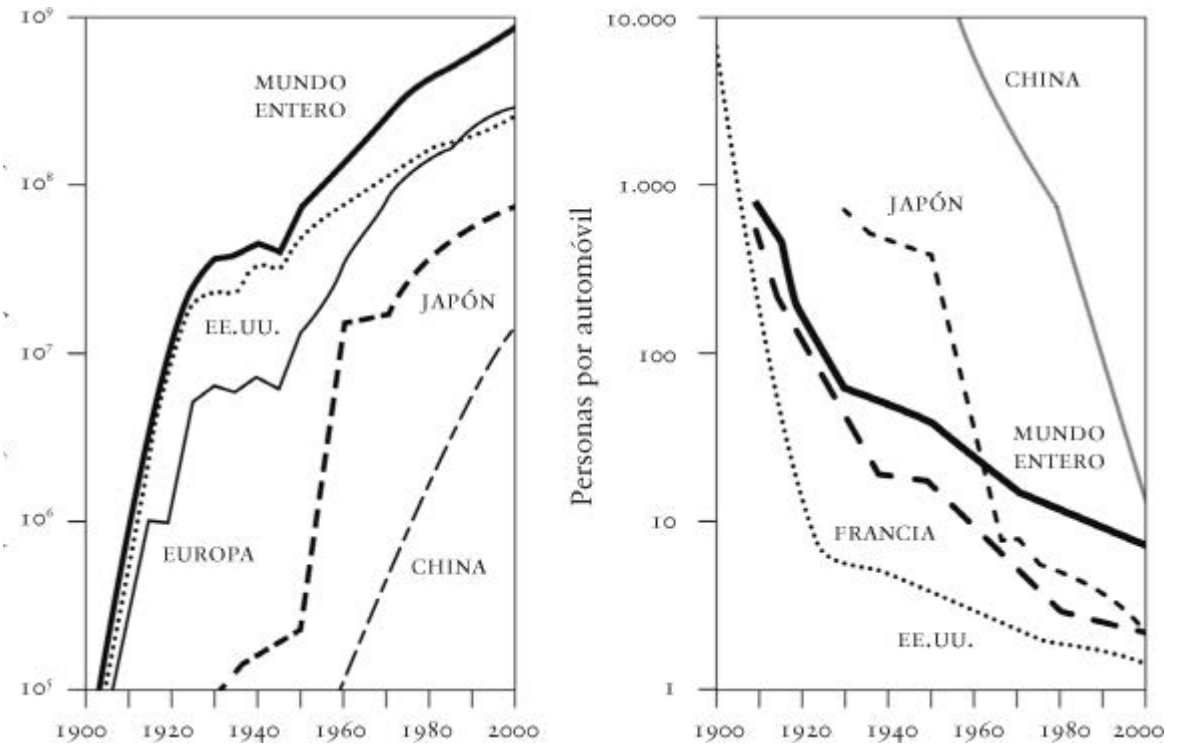


Figura 6.11 El total mundial de vehículos de carretera pasó de 10.000 en 1900 a más de 1.000.000.000 en 2010 (izquierda). Las matriculaciones en Estados Unidos fueron superadas por el total europeo a finales de la década de 1980, aunque el país sigue teniendo la tasa de propiedad más alta del mundo, 1,25 personas/automóvil en 2010 (derecha). Fuentes: informes anuales de la Asociación de Fabricantes de Automóviles y el Banco Mundial (2015b).

RECUADRO 6.6

Volkswagen y otros modelos duraderos

Ningún coche diseñado para el consumo de masas se acerca siquiera en producción agregada, tamaño y longevidad (aunque con modelos actualizados) al que Adolf Hitler decretó como el más adecuado para su pueblo (Nelson, 1998; Patton, 2004). En el otoño de 1933 Hitler fijó una serie de especificaciones: velocidad máxima de 100 km/h, 7 l/100 km de consumo de combustible, capacidad para dos adultos y tres niños, refrigerado por aire y con un precio inferior a 1.000 RM. En 1938 Ferdinand Porsche (1875-1951) tenía el coche —por cierto bastante feo y, ante la insistencia de Hitler, con aspecto de escarabajo (*Käfer*)— listo para su producción. La guerra impidió toda producción civil. El ensamblaje en serie del Escarabajo comenzó en 1945, bajo el mando del ejército británico dirigido por el mayor Ivan Hirst (1916-2000), quien salvó la fábrica de los daños que había sufrido (Volkswagen AG, 2013).

Durante los primeros años de la *Wirtschaftswunder* de Alemania occidental, antes de que los Mercedes, Audi y BMW se normalizaran, el automóvil inundó las carreteras alemanas, y durante los años sesenta Volkswagen se convirtió en la marca más importada en Estados Unidos, antes de que la desplazaran Honda y Toyota. La producción del Escarabajo original se detuvo en Alemania en 1977, pero continuó en Brasil hasta 1996 y en México hasta 2003. El último coche producido en la fábrica de Puebla fue el número 21.529.464. El New Beetle, con un exterior rediseñado por J. Mays y el motor en la parte delantera, se fabricó entre 1997 y 2011; a partir de 2012 el nombre del último diseño (A5) es Volkswagen Beetle otra vez.

El Renault 4CV, diseñado en secreto durante la Segunda Guerra Mundial, fue el equivalente francés del Escarabajo; se fabricaron más de un millón de unidades entre 1945 y 1961. El coche de bajo precio más famoso del país fue el Citroën 2CV, fabricado entre 1940 y 1990: los *deux chevaux* marcaban el número de cilindros; en realidad, el motor tenía 29 CV (Siuru, 1989). El ratoncito de Fiat, el Topolino, un biplaza con una distancia entre ejes de apenas 2 m, fue fabricado entre 1936 y 1955, y el británico Morris Minor entre 1948 y 1971. Todos estos modelos fueron eclipsados más adelante por diseños japoneses, que después de exportarse relativamente poco durante las décadas de 1960 y 1970 se convirtieron en los más vendidos a nivel mundial durante la década de 1980.

Hemos hecho esfuerzos extraordinarios para preservar este privilegio (y en Estados Unidos lo hemos facilitado vendiendo más del 90% de los vehículos a crédito), por lo que no puede sorprendernos

que chinos e indios quieran emular la experiencia estadounidense. Sin embargo, como toda adicción, esta también conlleva un alto precio. En 2015 había 1.250 millones de vehículos en las carreteras y se vendieron 73 millones de coches nuevos (Banco de Nueva Escocia, 2015); entre tanto, los accidentes de tráfico causan 1,3 millones de muertes y 50 millones de lesiones al año (OMS, 2015b), y la contaminación del aire causada por los automóviles ha sido un factor clave en el fenómeno mundial del *smog* fotoquímico estacional (o semipermanente) en las megalópolis de todos los continentes (USEPA, 2004). La vida útil de un automóvil oscila hoy entre casi once años en los países ricos y más de quince en los países pobres. Después el acero (y el cobre y algo de caucho) se reciclan en su mayor parte, pero hemos aceptado soportar enormes niveles de accidentes y contaminación.

El transporte en camión también ha tenido consecuencias socioeconómicas profundas. Su primera difusión masiva, en los Estados Unidos rurales después de 1920, redujo el coste y aceleró la distribución y la comercialización de los productos agrícolas. Estos beneficios se reprodujeron primero en Europa y Japón y durante las dos últimas décadas en muchos países de América Latina y Asia. En los países ricos, el transporte pesado de larga distancia se ha convertido en la columna vertebral de la entrega de alimentos, así como en un eslabón clave de la distribución de piezas industriales y productos manufacturados, y su buen funcionamiento se ha beneficiado del uso universal de contenedores descargados por grúas directamente de buques transoceánicos. En muchos países de crecimiento rápido el transporte por carretera ha obviado la construcción de ferrocarriles (Brasil es el mejor ejemplo) y ha abierto las regiones más aisladas al comercio y el desarrollo (y a la destrucción del medio ambiente). En los países pobres, los autobuses han sido el principal medio de transporte de pasajeros de larga distancia.

Los primeros barcos de vapor cruzaron el Atlántico norte a la misma velocidad que los mejores veleros de la época con vientos

favorables. Pero desde finales de la década de 1840 quedó clara la superioridad del vapor, con un récord de tiempo de travesía de menos de diez días (figura 6.12). En 1890 la norma eran los cascos de acero y viajes de menos de seis días. El acero eliminó las restricciones de tamaño: las consideraciones estructurales siempre limitaron la longitud de los cascos de madera a unos 100 m. Los famosos transatlánticos como Cunard, Collins o Hamburgo-América se convirtieron en orgullosos símbolos de la era de la técnica. Estaban equipados con potentes motores y hélices de doble pala y amueblados con grandes camarotes y ofrecían un excelente servicio.

La opulencia de estos grandes transatlánticos contrastaba con el hacinamiento, los malos olores y el tedio de los pasajes más baratos. En 1890 los barcos de vapor transportaban más de 500.000 pasajeros/año a Nueva York. A finales de la década de 1920 el tráfico total en el Atlántico norte superó el millón de pasajeros/año, y poco después los transatlánticos alcanzaron su tonelaje máximo (figura 6.12). En 1957 ya había más personas que cruzaban el Atlántico en avión que en barco. El inicio del servicio regular de aviones comerciales ese mismo año selló el destino del transporte de pasajeros de larga distancia (diez años más tarde finalizó el servicio transatlántico). Los barcos de vapor comerciales recibieron un impulso temprano con la finalización del canal de Suez en 1869 y la introducción de la refrigeración efectiva durante la década de 1880. Su crecimiento posterior fue estimulado por la apertura del canal de Panamá (1914), el despliegue de grandes motores diésel (después de 1920) y el transporte de petróleo. Desde la década de 1950 se han necesitado buques especializados más grandes para transportar no solo petróleo, sino también productos básicos voluminosos ampliamente comercializados (minerales, madera, cereales, productos químicos), así como cada vez más automóviles, maquinaria y bienes de consumo.

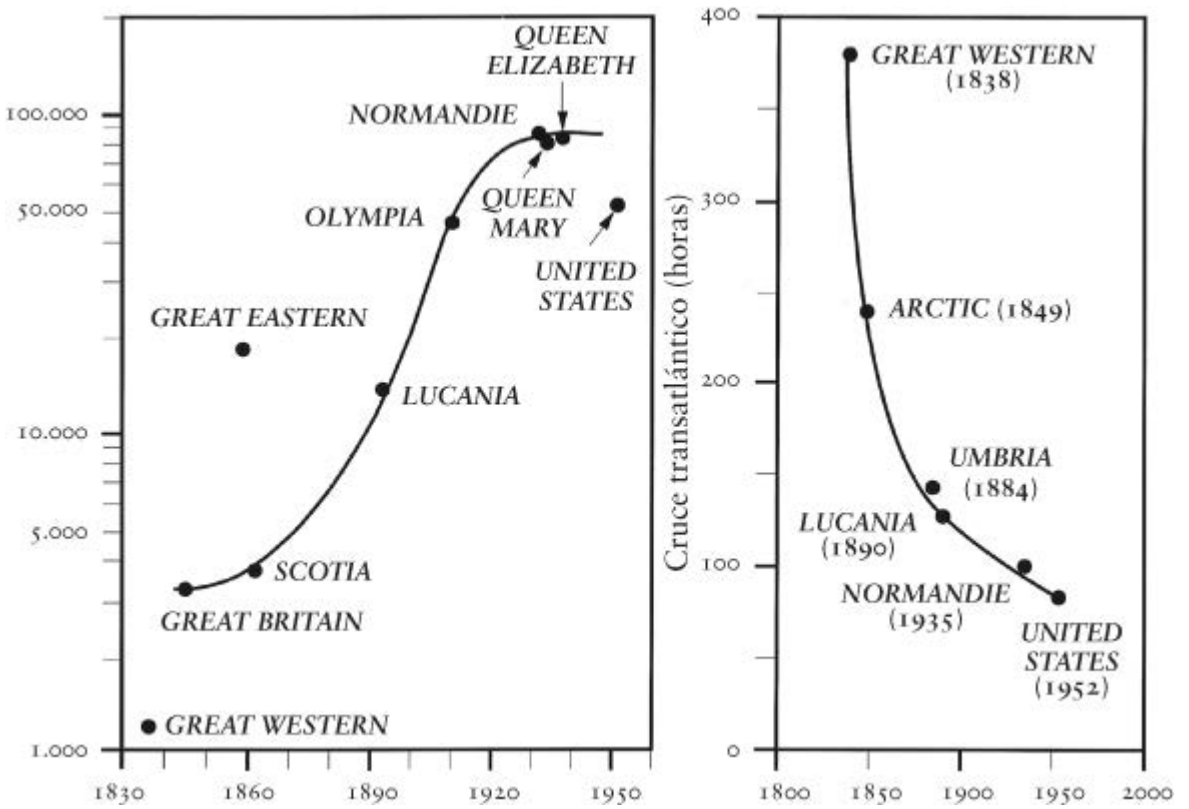


Figura 6.12 A medida que los barcos que conectaban Europa y América del Norte crecían en tamaño (izquierda) y se equipaban con motores más potentes, el tiempo necesario para cruzar el Atlántico se redujo de más de dos semanas a poco más de tres días (derecha). Fuentes: Fry (1896), Croil (1898) y Stopford (2009).

El transporte aéreo internacional regular comenzó con vuelos diarios Londres-París en 1919 a velocidades inferiores a 200 km/h, y alcanzó la categoría de transoceánico justo antes de la Segunda Guerra Mundial, cuando el Clipper de PanAm fue de San Francisco a Hong Kong en solo seis días en marzo de 1939 (figura 6.13). La era de los viajes aéreos masivos llegó con la introducción de los aviones de reacción a finales de los años 1950 (el Comet inglés, en servicio desde 1952, fue abandonado en 1954 después de tres desastres fatales). El Boeing 707 (primer vuelo en 1957, en servicio desde octubre de 1958) fue seguido del Boeing 727, de alcance medio (en servicio desde febrero de 1964 y fabricado hasta 1984), y el Boeing 737, de alcance corto y medio. El más pequeño de todos los aviones de Boeing se ha convertido en el avión más vendido de la historia: a mediados de 2015

se habían entregado más de 8.600 unidades (en comparación con unas 9.200 para todos los modelos de Airbus juntos). Durante las décadas de 1950 y 1960 McDonnell Douglas (DC-9, motor triple DC-10), General Dynamics (Convair), Lockheed (Tristar) y Sud Aviation (Caravelle) introdujeron sus propios aviones de pasajeros, pero, dejando de lado a los fabricantes rusos, a finales de siglo solo quedaban en pie el consorcio estadounidense Boeing y el europeo Airbus (recuadro 6.7).

La velocidad y alcance de estos aviones, la proliferación de líneas aéreas y vuelos y la vinculación casi universal de los sistemas de reserva han hecho posible viajar entre prácticamente todas las grandes ciudades del planeta en un solo día (figura 6.13). En 2000, el alcance máximo de los aviones de fuselaje ancho alcanzó los 15.800 km, y en 2015 los vuelos regulares más largos (Dallas-Sídney y Johannesburgo-Atlanta) duraban casi 17 h, mientras que muchas ciudades están conectadas por vuelos de enlace frecuentes (en 2015 había casi 300 vuelos diarios entre Río de Janeiro y São Paulo y casi 200 entre Nueva York y Chicago). Además, el coste de los vuelos ha disminuido constantemente en términos reales, en parte debido al menor consumo de combustible. Estas mejoras generaron nuevas oportunidades de negocio, así como un turismo masivo de larga distancia a las principales ciudades del mundo y las playas tropicales y subtropicales. También ofrecieron opciones de movimiento sin precedentes para migrantes y refugiados, contrabando de drogas generalizado y terrorismo internacional mediante secuestro de aeronaves.

Información y comunicación

Desde su nacimiento, las sociedades fósiles han producido, almacenado, distribuido y utilizado cantidades de información incomparablemente más grandes que sus predecesoras. En Asia oriental y en la Europa moderna temprana la impresión fue una actividad comercial establecida durante siglos antes de la llegada de los combustibles fósiles, pero la composición tipográfica manual era

laboriosa y las tiradas se veían limitadas por la lentitud de las prensas de tornillo de madera operadas a mano. Los marcos de hierro aceleraron el trabajo, pero incluso los mejores diseños de la prensa de Gutenberg no superaban las 240 impresiones/hora (Johnson, 1973). La primera prensa de vapor —diseñada por Friedrich Koenig y Andreas Friedrich Bauer y vendida al *Times* en 1814— alcanzaba las 1.100 impresiones/hora. En 1827 la cifra era de 5.000, y las primeras rotativas de la década de 1840 alcanzaban 8.000 impresiones/hora; veinte años más tarde, ya estábamos en 25.000 (Kaufer y Carley, 1993).

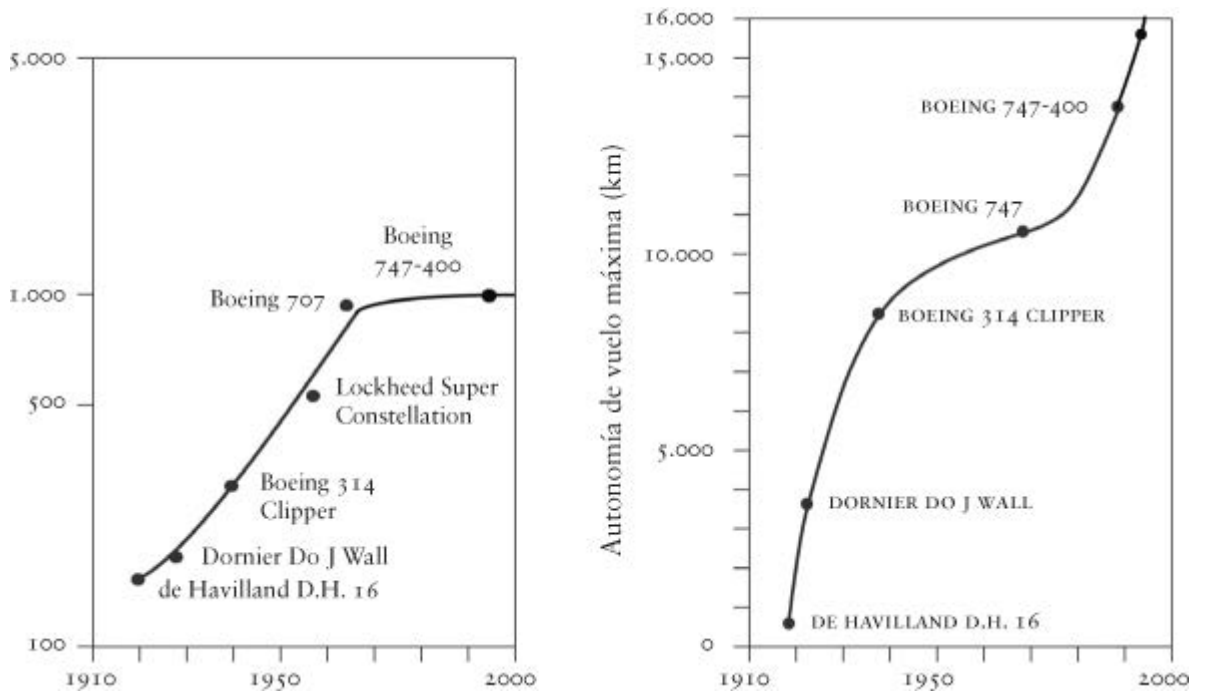


Figura 6.13 Los primeros vuelos comerciales con horario fijo (por de Havilland D.H. 16 en 1919) promediaban algo más de 150 km/h. Los aviones tenían un alcance máximo de 600 km (izquierda). A finales de la década de 1950 el Boeing 707 podía volar a casi 1.000 km/h y a finales de la década de 1990 el Boeing 777 volaba sin parar más de 15.000 km (derecha). El Concorde, volando a más del doble de la velocidad del sonido, fue una anomalía costosa, no un precursor de una nueva generación de aviones rápidos. Fuentes: Taylor (1989), Gunston (2002) y especificaciones técnicas del sitio web de Boeing.

RECUADRO 6.7

Boeing y Airbus

Boeing es una empresa estadounidense centenaria —establecida por William E. Boeing (1881-1956) en 1916— fabricante de diseños icónicos como el Boeing 314 Clipper y el 307 Stratoliner (ambos en 1938), el Boeing 707 (el primer avión de pasajeros exitoso, en 1957) y el Boeing 747, el primer avión de fuselaje ancho, en 1969 (Boeing 2015). La última apuesta de la compañía ha sido el Boeing 787, un diseño que utiliza fibras de carbono más ligeras y fuertes para el 80% del cuerpo, lo que permite un 20% más de eficiencia en el consumo de combustible que el 767 (Boeing, 2015). Airbus se creó en diciembre de 1970 con participación francesa y alemana y más tarde se unieron empresas españolas y británicas. Su primer avión bimotor, el Airbus A300 (226 pasajeros), fue lanzado en octubre de 1972. Después su oferta se amplió y cubrió todo tipo de aviones, desde los de corta distancia (los A319, A320 y A321), hasta los de larga distancia y fuselaje ancho (el A340). En 2000 Airbus superó por primera vez el número de aviones vendidos por Boeing. Su mayor innovación ha sido el A380, una embarcación de dos pisos de fuselaje ancho en servicio desde 2007 con una capacidad máxima de 853 pasajeros en una sola clase, pero por el momento solo se ha pedido en configuraciones de tres clases para 525 personas (en comparación con los 416 en tres clases y 524 en dos de los aviones Boeing 747-400).

Las dos compañías han competido duramente. Entre 2001 y 2015 Boeing entregó 6.803 aviones de pasajeros y Airbus produjo 6.133. Ambas empresas tienen pedidos por varios años para satisfacer el crecimiento de la demanda, en particular de Asia. Ambas empresas han concertado también muchos acuerdos de cooperación con diseñadores de aviones y motores y los proveedores de los principales componentes de los aviones en Europa, América del Norte y Asia, y ambas se enfrentan a una creciente competencia desde abajo. La compañía canadiense Bombardier y la brasileña Embraer han agrandado sus aviones de cercanías: el CRJ-900 de Bombardier tiene 86 asientos, mientras que el EMB-195 de Embraer puede tener hasta 122, y ambas empresas, así como la rusa Sukhoi Super-jet, la Corporación de Aviones Comerciales de China y la japonesa Mitsubishi están entrando en el lucrativo mercado de los aviones de fuselaje estrecho, al que ahora prestan servicio el Boeing 737 y los Airbus A319/320.

La publicación masiva de periódicos baratos se convirtió en una realidad cotidiana, con noticias que viajaban más rápido gracias al telégrafo (que se comercializó por primera vez en 1838) y, menos de dos generaciones más tarde, al teléfono (1876). Antes del final de siglo ya habían empezado a comercializarse dos nuevas técnicas de información y comunicación: la grabación y reproducción de sonido y el cine. Excepto la impresión, todas estas técnicas se desarrollaron en la era de la energía fósil. Salvo la fotografía y los primeros fonógrafos, ninguno podía funcionar sin electricidad. Y excepto el material impreso, en retroceso debido a que el formato electrónico toma su lugar, todas estas técnicas han expandido progresivamente su base de usuarios e incorporado nuevos modos de adquisición, almacenamiento, registro, visualización e intercambio en un mundo instantáneamente interconectado.

La telecomunicación barata, fiable y verdaderamente global solo fue posible con la electricidad. Su primer siglo de desarrollo estuvo dominado por los mensajes transmitidos por cable. Décadas de experimentos en distintos países culminaron con la presentación del primer telégrafo por William Cooke y Charles Wheatstone en 1837 (Bowers, 2001). Su funcionamiento dependía de una fuente de electricidad fiable, la batería de Alessandro Volta, diseñada en 1800. La adopción del sistema de codificación de Samuel Morse en 1838, así como el rápido desarrollo de líneas terrestres junto con el ferrocarril, constituyeron los desarrollos tempranos más notables. Los enlaces submarinos (a través del canal de la Mancha en 1851 y el Atlántico en 1866) y una gran cantidad de innovaciones técnicas (incluyendo algunos de los primeros inventos de Edison) hicieron que el telégrafo fuera global en solo dos generaciones. En 1900 los cables multiplexados con codificación automática transportaban millones de palabras cada día: desde mensajes personales hasta códigos diplomáticos, pasando por montones de cotizaciones bursátiles y órdenes comerciales.

El teléfono fue patentado por Alexander Graham Bell en 1876 pocas horas antes de que Elisha Grey hiciera una presentación paralela independiente (Hounshell, 1981). Este invento tuvo una aceptación aún más rápida a nivel local y regional (Mercer, 2006). Se tardó bastante en desarrollar enlaces de larga distancia fiables y baratos. El primer enlace transestadounidense llegó en 1915, mientras que el cable telefónico transatlántico se instaló en 1956. Por supuesto, existían enlaces de radioteléfono desde finales de la década de 1920, pero no eran ni baratos ni fiables. Los grandes monopolios telefónicos ofrecían un servicio asequible y fiable, pero no eran grandes innovadores: el clásico teléfono negro de marcación rotativa se introdujo a principios de la década de 1920 y siguió siendo la única opción disponible durante las cuatro décadas siguientes: el primer teléfono electrónico de marcación por tonos apareció en Estados Unidos en 1963.

Las técnicas de almacenamiento, reproducción y transmisión de sonido e imágenes se desarrollaron en paralelo a la telefonía. El fonógrafo de Thomas Edison (1877) era una sencilla máquina manual, igual que el gramófono de Emile Berliner (1851-1929), inventado en 1888 (Gronow y Saunio, 1999). El tocadiscos eléctrico solo se desarrolló de verdad en la década de 1920. La creación de imágenes avanzó con lentitud desde sus inicios en Francia, sobre todo gracias a la obra de J. N. Niepce y L. J. M. Daguerre durante las décadas de 1820 y 1830 (Newhall, 1982; Rosenblum, 1997). La primera cámara de caja barata de Kodak salió en 1888. El desarrollo se aceleró después de 1890, junto con la cinematografía. Los primeros cortometrajes públicos de los hermanos Lumière se proyectaron en 1895. Las películas sonoras llegaron a finales de la década de 1920 (el primer largometraje fue *El cantor de jazz*, en 1927), el primer largometraje en color (después de años de cortos en color) se estrenó en 1935, y la invención de la xerografía por Chester Carlson (1906-1968) llegó dos años después (Owen, 2004).

La aventura de la transmisión inalámbrica comenzó con la generación de ondas electromagnéticas de Heinrich Hertz (1857-1894) en 1887, anticipada por la formulación de la teoría de la radiación electromagnética de James Clerk Maxwell (1831-1879) (Maxwell, 1865; figura 6.14). El progreso práctico subsiguiente fue rápido. En 1899 las señales de Guglielmo Marconi (1874-1937) habían cruzado el canal de la Mancha y solo dos años después, el Atlántico (Hong, 2001). En 1897 Ferdinand Braun (1850-1918) inventó el tubo de rayos catódicos, el dispositivo que hizo posible tanto las cámaras de televisión como los receptores. En 1906 Lee de Forest (1873-1961) construyó el primer triodo, indispensable para la radiodifusión, la telefonía de larga distancia y los ordenadores hasta la invención del transistor.

Los programas regulares de radio comenzaron en 1920. La BBC ofreció su primer servicio programado de televisión en 1936, y la RCA siguió en 1939 (Huurdeman, 2003). Las calculadoras mecánicas —que comenzaron con el diseño prehistórico de Charles Babbage y Edward Scheutz después de 1820 (Lindgren, 1990; Swade, 1991) y culminaron con la creación de IBM en 1911— quedaron finalmente atrás con el desarrollo de las primeras computadoras electrónicas durante la Segunda Guerra Mundial. Pero estas máquinas —la británica Mark, la estadounidense Harvard Mark 1 y la ENIAC— eran dispositivos únicos, dedicados y masivos (del tamaño de una habitación, para acomodar miles de tubos de vacío de vidrio) sin perspectivas comerciales inmediatas.

Esta impresionante concatenación de técnicas y servicios de información y comunicación muy mejorados y completamente nuevos se vio totalmente eclipsada por los acontecimientos posteriores a la Segunda Guerra Mundial. Su fundamento común fue el surgimiento de la electrónica de estado sólido, que comenzó con la invención en Canadá del transistor, un dispositivo semiconductor de estado sólido en miniatura (el equivalente a un tubo de vacío que puede amplificar y conmutar señales electrónicas). Julius Edgar Lilienfeld presentó su

patente para el transistor de efecto campo en Canadá en 1925 y un año más tarde en Estados Unidos (Lilienfeld, 1930); en la solicitud de patente se esboza claramente la manera de controlar y amplificar el flujo de corriente entre los dos terminales de un sólido conductor.

Figura 6.14 Retrato grabado de James Clerk Maxwell, basado en una fotografía de Fergus (Corbis). La teoría del electromagnetismo de Maxwell supuso el pistoletazo de salida para el desarrollo de la electrónica inalámbrica moderna, que ha traído consigo comunicación instantánea barata y conectividad global. El mundo electrónico del siglo XXI se fundamenta en las ideas de Maxwell.

Con todo, Lilienfeld no intentó construir ningún dispositivo, y el primer éxito experimental, por dos investigadores de Bell Labs, Walter

Brattain y John Bardeen, el 16 de diciembre de 1947, usó un cristal de germanio (Bardeen y Brattain, 1950). Ahora el sitio web del Bell System Memorial admite que está «perfectamente claro que los laboratorios Bell no inventaron el transistor, sino que lo reinventaron», pero todavía no reconoce la gran cantidad de investigación y diseño pioneros que realizaron otros desde la primera década del siglo XX (Bell System Memorial, 2011). En cualquier caso, no fue el tosco dispositivo de contacto utilizado por Brattain y Bardeen, sino un transistor de efecto campo de unión más útil, patentado en 1951 por William Shockley (1910-1989), el que transformó la computación electrónica. Ese mismo año Gordon K. Teal y Ernest Buehler lograron fabricar cristales de silicio de mayor tamaño y dominar métodos mejorados de extracción de cristales y dopaje de silicio (Shockley, 1964; Smil, 2006).

En 1948 se produjo un avance teórico muy importante cuando Claude Shannon abrió el camino a la evaluación cuantitativa del coste energético de la comunicación (Shannon, 1948). A pesar de los impresionantes progresos realizados hasta entonces (un aumento de tres órdenes de magnitud en el transporte de conversaciones simultáneas por un solo cable no más grueso que un cabello humano), los límites teóricos de Shannon mostraban que el rendimiento todavía podía mejorarse en varios órdenes de magnitud. Sin embargo, después de la Segunda Guerra Mundial no hubo ningún *boom* del comercio de la informática electrónica, de tal manera que la primera UNIVAC (Universal Automatic Computer, una extensión de la ENIAC de Eckert-Mauchly) de Remington Rand no fue vendida a la Oficina del Censo de Estados Unidos hasta 1951.

La velocidad de cálculo de las nuevas máquinas programables comenzó a aumentar exponencialmente cuando los transistores sustituyeron a los tubos de vacío. El uso comercial de computadoras en Estados Unidos no despegó hasta finales de los años cincuenta, con Fairchild Semiconductor, Texas Instruments (que comercializó el primer transistor de silicio en 1954) e IBM como principales

desarrolladores de hardware y software (Ceruzzi, 2003; Lécuyer y Brock, 2010). En 1958-1959 Jack S. Kilby (1923-2005) en Texas Instruments y Robert Noyce (1927-1990) en Fairchild Semiconductor inventaron independientemente circuitos miniaturizados integrados en el cuerpo del material semiconductor (Noyce, 1961; Kilby, 1964). El diseño de Noyce de un transistor planar dio paso a la era de la electrónica de estado sólido (recuadro 6.8).

El ejército de Estados Unidos fue el primer cliente de los circuitos integrados. En 1965, después de que el número de transistores en un microchip pasara de 32 a 64 desde el año anterior, Gordon Moore predijo que este ritmo de duplicación continuaría (Moore, 1965). En 1975 rebajó el ritmo a una duplicación cada dos años (Moore, 1975). Esta regla, comúnmente conocida como ley de Moore, se ha mantenido desde entonces (figura 6.15). El primer producto comercial controlado por microprocesador del mundo fue una calculadora programable de Busicom, una pequeña empresa japonesa; su juego de cuatro chips fue diseñado por la recién establecida Intel en 1969-1970 (Augarten, 1984). Busicom apenas llegó a vender unos pocos modelos grandes de calculadoras que usaban el conjunto de chips MCS-4 antes de quebrar en 1974. Por pura casualidad, Intel había tenido la previsión de recomprar los derechos del procesador antes de que eso ocurriera, y lanzó el primer microprocesador universal del mundo —el Intel 4004, de 3 mm × 4 mm, que contenía 2.250 transistores semiconductores de óxido metálico y costaba 200 dólares— en noviembre de 1971. Sus 60.000 operaciones por segundo eran el equivalente funcional de la ENIAC (del tamaño de una habitación) de 1945 (Intel, 2015).

RECUADRO 6.8

Invención de los circuitos integrados

Robert Noyce era director de investigación en Fairchild Semiconductors en Santa Clara, California, cuando escribió en su cuaderno de laboratorio que

> sería deseable colocar múltiples dispositivos en una sola pieza de silicio para poder hacer interconexiones entre los dispositivos como parte del proceso de fabricación, y así reducir el tamaño, el peso, etc., así como el coste por elemento activo. (Reid, 2001, 13)

La solicitud de patente de Noyce de 1959 para una «estructura semiconductora de dispositivos y conducción» (*Semiconductor Device-and-Lead Structure*) mostraba un circuito integrado plano. Especificaba

> uniones cóncavas que se extienden por la superficie de un cuerpo semiconductor extrínseco, una capa superficial de revestimiento que consiste esencialmente en óxido del mismo semiconductor que se extiende entre las uniones, y que conduce en forma de tiras de metal puestas al vacío (o de otra manera) que se extienden y se adhieren a la capa de óxido aislante para establecer conexiones eléctricas con y entre diferentes partes del cuerpo semiconductor sin cortocircuitar las uniones. (Noyce, 1961, 1)

La patente de Noyce (nº 2.981.877) se concedió en abril de 1961 y la de Kilby (nº 3.138.743) en julio de 1964, pero el procedimiento de interferencia, los litigios y las apelaciones no se resolvieron hasta 1971, cuando el Tribunal Supremo falló a favor de Noyce. Fue una victoria innecesaria, porque en verano de 1966 las dos compañías acordaron compartir sus licencias de producción y exigir a otros fabricantes que fijaran acuerdos separados con ambas. Las ideas de Kilby y Noyce eran idénticas, pero Noyce murió de un ataque al corazón en 1990, mientras que Kilby vivió lo suficiente para compartir el Premio Nobel de Física en 2000 «por su participación en la invención del circuito integrado».

El despliegue universal de microprocesadores cada vez más potentes y dispositivos de memoria con cada vez mayor capacidad ha afectado a todos los sectores de la industria, el transporte, los servicios y las comunicaciones modernos, y el espectacular crecimiento de estas capacidades ha ido acompañado de una constante reducción del coste y una mejora de la fiabilidad (Williams, 1997; Ceruzzi, 2003; Smil, 2013c; Intel, 2015). Los microchips se han convertido en el artefacto

complejo más omnipresente de la civilización moderna: cada año se producen más de 200.000 millones de ellos, y pueden encontrarse desde en artículos domésticos cotidianos (termostatos, hornos y aparatos electrónicos) hasta en la fabricación automática de ensamblajes complejos, incluido el diseño y la fabricación de microprocesadores propiamente dichos. Gobiernan el tiempo de ignición del combustible en los motores de los automóviles, optimizan el funcionamiento de las turbinas de los aviones y guían los cohetes para colocar los satélites en sus trayectorias predeterminadas.

Sin embargo, el impacto más directo de los microprocesadores para las personas ha sido la propiedad masiva de dispositivos electrónicos portátiles, sobre todo teléfonos celulares. Esta evolución vino precedida por el auge de los ordenadores personales, el desarrollo sorprendentemente largo de Internet y un periodo de adopción relativamente lenta de los teléfonos móviles. El centro de investigación de Palo Alto de Xerox (Xerox PARC) inventó la computación personal durante la década de 1970 al combinar la potencia de procesamiento de los microchips con un ratón, una interfaz gráfica de usuario, iconos y menús emergentes, impresión láser, edición de textos, corrección ortográfica y acceso a servidores de archivos e impresoras con acciones de apuntar y clicar (Smil, 2006; figura 6.16). Sin estos avances, Steven Wozniak y Steven Jobs no podrían haber inventado el primer PC comercial de éxito, el Apple II con gráficos a color, en 1977 (Moritz, 1984). El ordenador personal de IBM fue lanzado en 1981. En Estados Unidos, la propiedad de ordenadores personales pasó de dos millones de unidades en 1983 a 54 millones en 1990 (Stross, 1996). Los ordenadores de mesa ligeros, los ordenadores portátiles y las tabletas maduraron a finales de la década de 1990, y el iPad de Apple fue presentado en 2010.

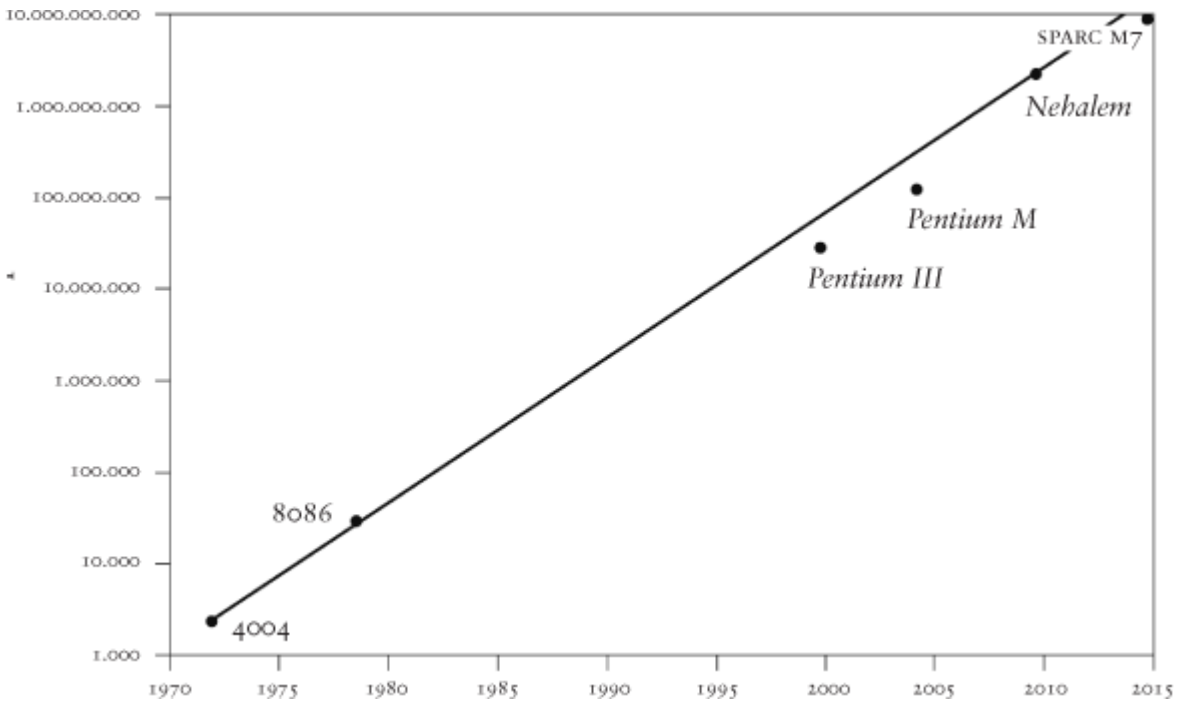


Figura 6.15 La ley de Moore en la práctica. El primer microchip comercial (Intel 4004) tenía 2.250 transistores semiconductores de óxido metálico, mientras que los últimos diseños tienen más de dos mil millones de componentes, un aumento de seis órdenes de magnitud (millones de veces). Fuentes: Smil (2006) e Intel (2015).

Figura 6.16 Práctico pero revolucionario: el ordenador de mesa Xerox Alto, lanzado en 1973, fue la primera encarnación casi completa de los rasgos básicos característicos de todos los PC posteriores (fotografía de Wikimedia).

La comunicación entre ordenadores fue propuesta por primera vez en 1962 por Joseph Licklider, el primer director de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada del Pentágono, y comenzó en 1969 con ARPANET, limitada a solo cuatro emplazamientos: el Instituto de Investigación de Stanford, UCLA, UCSB y la Universidad de Utah. En 1972 Ray Tomlinson de BBN Technologies diseñó programas para enviar mensajes a otros ordenadores y eligió el signo @ como símbolo localizador de las direcciones de correo electrónico (Tomlinson, 2002). En 1983 ARPANET convirtió un protocolo que

permitía comunicarse a través de un sistema de redes, y en 1989, cuando cerró el programa, tenía más de 100.000 *hosts*. Un año más tarde, Tim Berners-Lee creó la World Wide Web basada en hipertexto en el CERN de Ginebra con el fin de organizar la información científica en línea (Abbate, 1999). Los primeros sitios web no eran de navegación fácil, pero eso cambió rápidamente con la llegada de navegadores eficientes, empezando por Netscape en 1993.

El primer gran avance electrónico en la telefonía fue la posibilidad de realizar llamadas intercontinentales baratas gracias a la marcación automática a través de satélites geoestacionarios. Esta innovación fue el resultado de una combinación de avances microelectrónicos y el lanzamiento de potentes cohetes durante la década de 1960, y a medida que los costes subyacentes disminuyeron, las llamadas se hicieron más baratas. Pero el primer cambio radical en la telefonía se produjo con la invención de los teléfonos móviles (celulares), demostrados por primera vez en 1973. En 1983 en Estados Unidos existía un costoso servicio de pago con voluminosos aparatos Motorola. El número de propietarios no aumentó rápidamente hasta finales de los años 1990 (con Japón y la Unión Europea por delante de Estados Unidos). La venta mundial de teléfonos móviles superó los 100 millones de unidades en 1997, año en que Ericsson introdujo el primer teléfono inteligente.

La venta de teléfonos móviles alcanzó la marca de los mil millones en 2009. A finales de 2015 había 7.900 millones de dispositivos en uso y el total de envíos anuales de dispositivos móviles (incluyendo tabletas, portátiles y *netbooks*) había alcanzado 2.200 millones de unidades, de las cuales 1.880 millones eran teléfonos móviles (Gartner, 2015; mobiForge, 2015). Este impresionante y cambiante sistema de dispositivos de comunicación, entretenimiento, monitoreo y almacenamiento de datos requiere gran cantidad de energía para ser incorporado en dispositivos electrónicos de alta intensidad energética. Además, es totalmente dependiente de un suministro de electricidad continuo y altamente fiable para la infraestructura que requiere: desde

centros de procesamiento de datos hasta torres celulares (recuadro 6.9).

Cabe destacar los enormes progresos realizados desde la década de 1960 en el diseño y despliegue de una amplia gama de técnicas de diagnóstico, medición y teledetección. Estos avances produjeron una riqueza de información inimaginable hasta entonces. En 1900, la única opción eran los rayos X, descubiertos por W. K. Roentgen (1845-1923) en 1895. En 2015, estas técnicas iban desde el ultrasonido (utilizado tanto en el diagnóstico médico como en la ingeniería) hasta la obtención de imágenes de alta resolución (resonancia magnética, tomografía computarizada), pasando por el radar (desarrollado justo antes de la Segunda Guerra Mundial y que actualmente es un instrumento indispensable en el transporte y la vigilancia meteorológica) y una amplia gama de sensores basados en satélites que adquieren datos en diversas bandas del espectro electromagnético y permiten mejorar muchísimo los pronósticos meteorológicos y la gestión de los recursos naturales.

RECUADRO 6.9

La energía incorporada en los teléfonos móviles y los coches

Un coche compacto pesa 10.000 veces más que un teléfono inteligente (1,4 t frente a 140 g) y, por tanto, representa un consumo energético mucho mayor. Pero la diferencia es mucho menor que la diferencia de masa, que es de cuatro órdenes de magnitud. Además, las cuentas agregadas arrojan resultados sorprendentes: la producción de un teléfono móvil consume 1 GJ de energía, mientras que la de un coche requiere 100 GJ, solo cien veces más. En 2015 la venta mundial de teléfonos móviles se acercó a los 2.000 millones de unidades, por lo que su producción requirió 2 EJ (el equivalente a 48 millones de t métricas de petróleo). En 2015 se vendieron alrededor de 72 millones de automóviles en todo el mundo, y su producción representó 7,2 EJ, es decir, menos de cuatro veces el total de los teléfonos móviles.

Los teléfonos móviles tienen una vida útil muy corta (dos años de media) y hoy su producción representa 1 EJ por año de uso. Los coches duran al menos

una década de media, de tal manera que su producción global representa 0,72 EJ por año de uso, ¡un 30% menos que la fabricación de teléfonos móviles! Esto significa que incluso si estos agregados aproximados estuvieran equivocados en direcciones opuestas, los totales seguirían siendo sorprendentemente parecidos. Eso sí, el coste energético operativo, por supuesto, es muy diferente en cada caso. Un teléfono inteligente consume solo 4 kWh/año, menos de 30 MJ durante sus dos años de servicio (el 3% de su coste energético de producción). Por el contrario, durante su vida útil un automóvil compacto consume 4-5 veces más energía (en forma de gasolina o gasóleo) que su producción. No obstante, el coste de electrificar las redes de información y comunicación del mundo está en aumento: representaba casi el 5% de la generación de electricidad mundial en 2012 y en 2020 se acercó al 10% (Lannoo, 2013).

Crecimiento económico

Hablar de energía y economía es una tautología: fundamentalmente, toda actividad económica es una conversión de un tipo de energía a otro; el dinero es solo un sustituto conveniente (y a menudo poco representativo) para valorar flujos de energía. No es de extrañar que Frederick Soddy, un Nobel de Física que aborda la disciplina desde esta perspectiva, sostuviera que «los flujos de energía deberían ser la principal preocupación de la economía» (Soddy, 1933: 56). Al mismo tiempo, los flujos de energía son una mala medida de la actividad intelectual: los empleados y las infraestructuras educativas requieren un gran consumo de energía, pero las ideas brillantes (que en ningún caso están directamente vinculadas con la intensidad de la escolarización) no requieren ningún aumento sustancial de la tasa metabólica del cerebro.

Esta obviedad explica en buena medida el reciente desacoplamiento entre el crecimiento del PIB y el consumo energético global: imputamos valores monetarios mucho más altos a esfuerzos no físicos que ahora constituyen la mayor parte del producto económico. En cualquier caso, la energía ha sido una problemática marginal en la teoría económica moderna; solo los economistas ecologistas la han

considerado como un elemento central (Ayres, Ayres y Warr, 2003; Stern, 2010). Y la preocupación pública por la energía y la economía se ha centrado de manera desproporcionada en el precio de la energía en general y el petróleo, el producto básico más importante del comercio mundial, en particular.

En Occidente, el aumento del precio del petróleo por parte de los países de la OPEP durante la década de 1970 —que generó un exceso de consumo en Oriente Medio y supuso una grave amenaza para la estabilidad de la región— se convirtió en objeto predilecto de crítica al vincularse con trastornos económicos y agitación social. Pero ese aumento de precio tuvo un efecto saludable (y esperado durante largo tiempo) en la eficiencia con que los países importadores de petróleo consumían combustibles refinados. En 1973, después de cuatro décadas de lento deterioro, el consumo medio específico de combustible de los nuevos automóviles estadounidenses superaba el de principios de la década de 1930 (17,7 l/100 km frente a 14,8 l/100 km), un ejemplo muy poco frecuente de conversión energética moderna cada vez menos eficiente.

El aumento de los precios del petróleo obligó a dar marcha atrás, y entre 1973 y 1987 el consumo medio de combustible de los nuevos automóviles en el mercado norteamericano se redujo a la mitad, al fijarse la nueva norma CAFE (Corporate Automobile Fuel Efficiency) en 8,6 l/100 km. Lamentablemente, la caída de los precios del petróleo después de 1985 detuvo e incluso invirtió (al fabricarse más 4x4 y camionetas) este progreso de eficiencia. El retorno a la racionalidad no llegó hasta 2005. Además, el aumento de precios de la OPEP tuvo un efecto positivo en la economía mundial, ya que redujo significativamente su intensidad media de petróleo (cantidad de petróleo consumida por unidad de PIB). Las centrales eléctricas dejaron de quemar combustibles líquidos, los fabricantes de hierro sustituyeron el fueloil por carbón pulverizado en altos hornos, los motores de reacción se volvieron más eficientes y muchos procesos industriales pasaron al gas natural. Los resultados en las últimas

décadas han sido impresionantes. En 1985 Estados Unidos necesitaba un 37% menos de petróleo para producir un dólar de PIB que en 1970; en 2000, un 53% menos; y en 2014, un 62% menos (Smil, 2015c).

Curiosamente (o no), suele olvidarse que los gobiernos occidentales han ganado más dinero con el petróleo que la propia OPEP. En 2014 los impuestos representaban el 47% del precio del petróleo en los países del G7, comparado con el 39% destinado a los productores, con cuotas nacionales de 60/30 en Reino Unido, 52/34 en Alemania y 15/61 en Estados Unidos (OPEP, 2015). Además, para garantizar un suministro seguro muchos gobiernos han regulado muchísimo la industria (incluso en economías de libre mercado), mientras que los gobiernos de muchos países productores de petróleo han comprado apoyo político con importantes subsidios al precio de la energía (GSI, 2015). En Arabia Saudita, los subsidios representaron más del 20% del gasto gubernamental en 2010. En China, los subsidios al carbón han llegado a hacer que se fijen precios por debajo del coste de producción.

El crecimiento —sus orígenes, su ritmo y su persistencia— ha sido la principal preocupación de la investigación económica moderna (Kuznets, 1971; Rostow, 1971; Barro, 1997; Galor, 2005). Por eso el vínculo entre el consumo de energía y el aumento del producto económico bruto (ya sea el PIB o el producto mundial bruto) ha recibido una gran atención (Stern, 2004, 2010; Foro Económico Mundial, 2012; Ayres, 2014). Las economías preindustriales tradicionales eran en gran medida estacionarias o crecían como máximo un poquito cada década, mientras que el consumo energético medio per cápita avanzó a un ritmo aún más lento: existen multitud de testimonios de las primeras décadas del siglo XIX que muestran que las condiciones de vida de los más pobres no eran muy diferentes de las que habían prevalecido dos, tres e incluso cuatro siglos antes.

En cambio, las economías fósiles han registrado tasas de crecimiento sin precedentes, aunque modificadas por el carácter cíclico

de la expansión económica (Van Duijn, 1983; ECRI, 2015) e interrumpidas por importantes conflictos internos o internacionales. Las sociedades industrializadas del siglo XIX crecieron al 20-60% por década. Tales tasas de crecimiento significan que la producción de la economía británica en 1900 fue diez veces mayor que en 1800. El PIB de Estados Unidos se duplicó en solo veinte años, entre 1880 y 1900. Durante la era Meiji (1868-1912), el PIB japonés aumentó 2,5 veces. El crecimiento económico de la primera mitad del siglo XX se vio afectado por dos guerras mundiales y la gran crisis económica de la década de 1930, pero nunca ha habido un periodo de crecimiento tan rápido y generalizado de la producción y la prosperidad como 1950-1973.

La constante bajada del precio real del petróleo antes de 1970 fue un ingrediente crítico de esta expansión sin precedentes. El PIB per cápita estadounidense —que ya era el más elevado del mundo— aumentó en un 60%. En Alemania Occidental esta tasa se triplicó, y la de los japoneses se sextuplicó. Varios grandes países pobres de Asia y América Latina también entraron en una fase de vigoroso crecimiento económico. La primera «crisis del petróleo» (1973-1974) detuvo este crecimiento. La segunda, en 1979, fue causada por el derrocamiento de la monarquía iraní y el ascenso al poder de los ayatolás fundamentalistas. La desaceleración económica mundial a principios de la década de 1980 estuvo acompañada de una inflación sin precedentes y un alto nivel de desempleo, pero durante la década de 1990 la estabilización del (bajo) precio del petróleo favoreció otro periodo de crecimiento, que no terminó hasta 2008, con la peor recesión mundial posterior a la Segunda Guerra Mundial, seguida de una débil recuperación.

Ayres, Ayres y Warr (2003) identifican el precio decreciente del trabajo útil como motor de crecimiento de la economía de Estados Unidos durante el siglo XX, siendo el trabajo útil el producto de la exergía (el máximo trabajo posible en un proceso ideal de conversión de energía) y la eficiencia de conversión. Una vez que se normalizan

los datos históricos económicos (con el PIB expresado en dinero constante y ajustado en función de la inflación y el PNB utilizado para calcular la riqueza global en términos de paridad de poder adquisitivo en lugar de utilizar los tipos de cambio oficiales), surgen correlaciones a largo plazo impresionantemente fuertes entre crecimiento económico y consumo energético tanto a nivel mundial como nacional.

Entre 1900 y 2000 el consumo de energía primaria (después de restar las pérdidas de procesamiento y los usos no combustibles de los combustibles fósiles) se multiplicó por ocho (de 44 a 382 EJ), y el producto global bruto aumentó 18 veces, de 2 billones de dólares a 37 billones de dólares en dinero constante de 1990 (Smil, 2010a; Proyecto Maddison, 2013), lo que implica una elasticidad inferior a 0,5. Y hay altas correlaciones entre ambas variables para un solo país a lo largo del tiempo, aunque las elasticidades difieren: durante el siglo XX, en Japón el PIB se multiplicó por 52 y el consumo de energía por 50 (elasticidad muy cercana a 1); en Estados Unidos, los múltiplos fueron respectivamente 10 y 25 veces (elasticidad inferior a 0,4); y en China 13 y 20 veces (elasticidad de 0,6).

El estrecho vínculo entre las dos variables también queda reflejado en la muy alta correlación (>0,9) entre el PIB per cápita y la oferta de energía a nivel mundial. En realidad, se trata de una correlación inusualmente alta en el ámbito normalmente ingobernable de los asuntos socioeconómicos, pero el efecto se debilita considerablemente cuando examinamos grupos de países más homogéneos: enriquecerse requiere un aumento sustancial del consumo energético, pero el aumento relativo del consumo energético entre países prósperos, tanto medido por unidad de PIB como per cápita, varía ampliamente y arroja correlaciones muy bajas.

Por ejemplo, Italia y Corea del Sur tienen un PIB per cápita muy similar —ajustado en términos de poder adquisitivo, unos 35.000 dólares en 2014—, pero el consumo de energía per cápita en Corea del Sur es un 90% más elevado que en Italia. Por el contrario, Alemania y Japón consumen casi la misma energía (170 GJ/cápita), pero en 2014

el PIB alemán era un 25% más alto (FMI, 2015; USEIA, 2015d). Y el aumento del consumo absoluto de energía necesario para producir un mayor rendimiento económico oculta una importante disminución relativa. Las economías maduras de altos ingresos y alto consumo energético tienen una intensidad energética (energía por unidad de PIB) significativamente menor que la que tenían en las etapas iniciales de su desarrollo (recuadro 6.10, gráfico 6.17).

La lección más importante que puede extraerse del examen del consumo de energía y el crecimiento económico a largo plazo es que pueden lograrse niveles respetables de este último con cada vez menos cantidad del primero. En Estados Unidos un continuo pero lento crecimiento de la población ha traído consigo nuevos aumentos en el consumo absoluto de combustibles y electricidad, pero el consumo de energía primaria per cápita se ha mantenido plano (con solo pequeñas fluctuaciones) durante tres décadas, desde mediados de la década de 1980, y, sin embargo, el PIB real per cápita (en dólares de 2009) aumentó un 57%, pasando de 32.218 dólares en 1985 a 50.456 en 2014 (FRED, 2015). De manera parecida, tanto en Francia como en Japón (donde la población actualmente disminuye) el consumo de energía primaria per cápita se ha estabilizado desde mediados de los años 1990, aunque en las dos décadas siguientes el PIB per cápita medio aumentó, respectivamente, un 20% y un 10%.

Con todo, estos resultados deben interpretarse con cautela, ya que este periodo de desacoplamiento relativo entre energía y PIB coincide con una amplia deslocalización de la industria pesada y manufacturera (muy consumidora de energía) de Estados Unidos, Europa y Japón a Asia en general y China en particular. Sería prematuro llegar a la conclusión de que la experiencia reciente de estas tres grandes economías presagia una tendencia generalizada al desacoplamiento. Y, principalmente debido al enorme crecimiento de la demanda energética de China antes de 2014 (que se ha multiplicado por 4,5 desde 1990), la oferta mundial de energía primaria aumentó un 60%, para multiplicar el producto global por 2,8 durante los 25 años

posteriores a 1990 (elasticidad de 0,56). Además, la reducción de la intensidad de la electricidad ha sido mucho más lenta que la reducción de la intensidad de la energía en general. Entre 1990 y 2015 la caída global fue del 20% (comparado con >40% para toda la energía); en Estados Unidos también fue del 20%, pero en China, un país en plena transformación, no hubo ninguna caída entre 1990 y 2015.

La intensidad en energía primaria (y electricidad) del crecimiento económico mundial ha ido reduciéndose, pero, debido al tamaño de la economía mundial y el crecimiento demográfico en Asia y África, en las próximas décadas se repetirá el patrón histórico, aunque de otra manera: se necesitará muchísimo combustible y grandes adiciones de capacidad de generación de electricidad para dinamizar el crecimiento económico de los países en vías de modernización. Obviamente, tanto el inicio como el mantenimiento de un fuerte crecimiento económico son cuestiones que tienen que ver con *inputs* complejos e interdependientes. Requieren mejoras técnicas y adaptaciones institucionales, en particular un sistema bancario y jurídico sólido. También son esenciales políticas gubernamentales apropiadas, un buen sistema educativo y una elevada competitividad. Pero si los países más pobres pasan de la pobreza a una incipiente prosperidad (reproduciendo la trayectoria económica de China después de 1990), ninguno de estos factores podrá marcar la diferencia sin el aumento del consumo de combustibles y electricidad: la ausencia de correlación entre crecimiento económico y consumo de energía desafiaría las leyes de la termodinámica.

RECUADRO 6.10

La intensidad energética decreciente del crecimiento económico

Las series estadísticas históricas muestran una reducción constante de la intensidad energética británica tras el rápido aumento generado por la adopción de las máquinas de vapor y el transporte ferroviario entre 1830 y 1850 (Humphrey y Stanislaw, 1979). La intensidad canadiense y

estadounidense siguió la tendencia decreciente británica con un retraso de 60-70 años. En Estados Unidos la tasa máxima se alcanzó antes de 1920, en China a finales de la década de 1970 y en la India a principios del siglo XXI (Smil, 2003). Entre 1955 y 1973 la intensidad energética de Estados Unidos se mantuvo estable (±2%), mientras que el PIB real creció 2,5 veces, y luego reanudó su descenso, de tal manera que en 2010 era un 45% más baja que en 1980.

En contraste, en Japón la intensidad energética aumentó hasta 1970 y luego se redujo en un 25% entre 1980 y 2010 (USEIA, 2015d). En China, la intensidad energética entre 1980 y 2013 bajó un 75% (China Energy Group, 2014), una evolución particularmente impresionante que refleja tanto la eficiencia extremadamente baja del país durante los primeros años post-Mao como su modernización desde 1980. Por otro lado, la India, que todavía se encuentra en una fase temprana de su desarrollo económico, solo experimentó un descenso del 7% entre 1980 y 2010. Esta disminución se debe a la combinación de varios factores: la importancia decreciente de los insumos de capital con uso intensivo de energía que caracteriza las primeras etapas del desarrollo económico, muy centradas en el desarrollo de infraestructuras básicas; la mejora de la eficiencia de conversión en el uso de la electricidad y los combustibles; y el crecimiento de los servicios (comercio minorista, educación, banca, etc.), en los que la creación de valor requiere menos energía por unidad de PIB que la industria extractiva o manufacturera.

Las importantes diferencias que pueden existir entre países con un nivel de desarrollo parecido también se explican por la composición del consumo de energía primaria (alguien tiene que producir metales, lo cual consume mucha energía), la eficiencia en la conversión final (la hidroelectricidad siempre es mejor que el carbón), el clima y el tamaño del territorio (Smil, 2003). En un baremo en el que Estados Unidos puntúa 100, en 2011 las tasas relativas eran de 60 en Japón y Alemania, 70 en Suecia, 150 en Canadá y 340 en China. Curiosamente, Kaufmann (1992) demostró que la mayor parte de la reducción de la intensidad energética posterior a 1950 en las economías prósperas se debe a cambios en el tipo de energías utilizadas y bienes y servicios dominantes, y no tanto a avances técnicos.

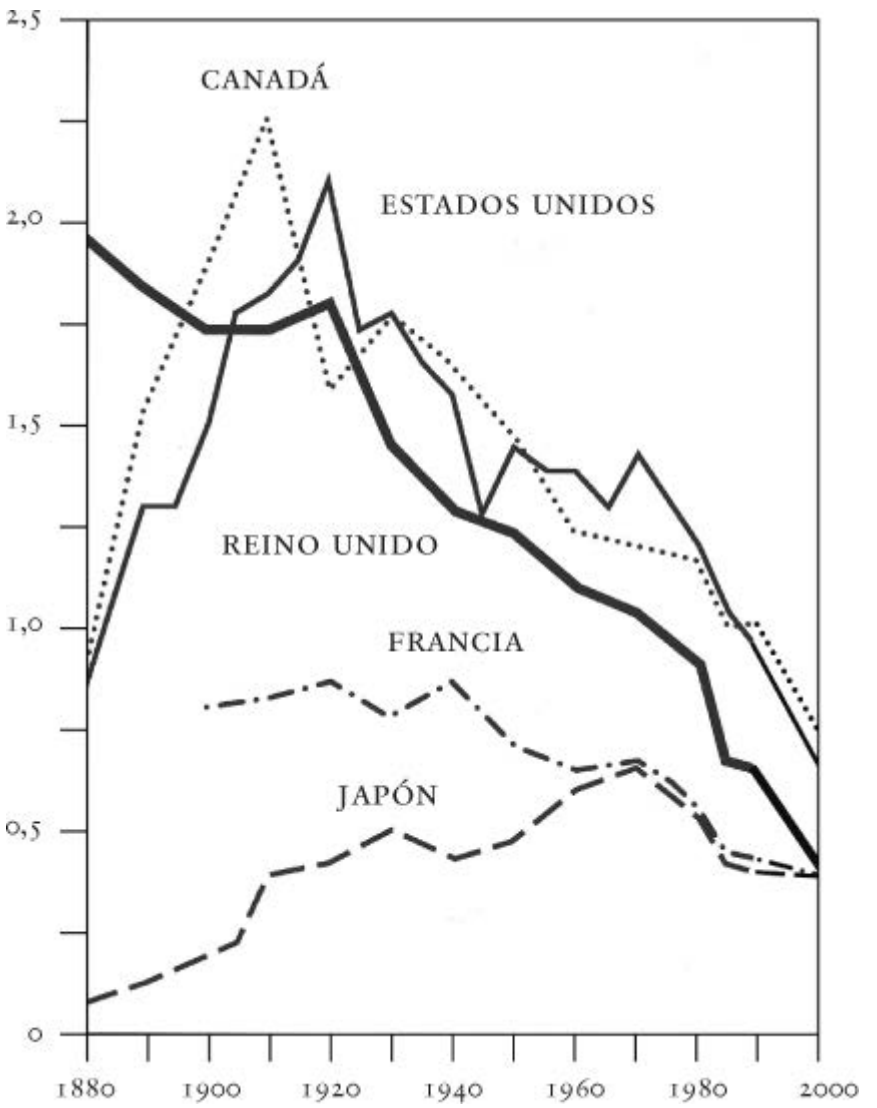


Figura 6.17 La reducción progresiva de la intensidad energética del PIB ha sido una característica universal del desarrollo económico. Fuentes: Smil (2003) y USEIA (2015d).

CONSECUENCIAS Y PREOCUPACIONES

Las consecuencias negativas del elevado consumo energético de las sociedades modernas abarcan desde manifestaciones físicas evidentes hasta cambios graduales cuyos resultados indeseables solo son (o serán) visibles después de mucho tiempo. A la primera categoría pertenece un abundante suministro de alimentos que fomenta tasas de desperdicio insoportablemente elevadas y contribuye a niveles sin

precedentes de sobrepeso (índice de masa corporal de 25-30) y obesidad (índice de masa corporal de >30). Esta tendencia es todavía más acusada debido a la reducción del gasto energético, con estilos de vida más sedentarios derivados del reemplazo masivo del esfuerzo muscular por máquinas y el uso ubicuo de automóviles incluso para desplazamientos cortos que solían hacerse a pie. En 2012, un 69% de la población de Estados Unidos tenía sobrepeso o era obesa, en comparación con un 33% durante la década de 1950 (CDC, 2015), lo cual constituye una prueba clara de que estas condiciones se han adquirido mediante una combinación de comida en exceso y reducción de la actividad física.

Estados Unidos no es el único país con una tasa de sobrepeso y obesidad en aumento (en Arabia Saudita la tasa es todavía más elevada, y en China el aumento de exceso de peso en niños es rapidísimo), pero la tendencia no es (¿todavía?) mundial: muchos países europeos y la mayoría de países de África subsahariana todavía tienen masas corporales apropiadas. En cualquier caso, no quiero centrarme únicamente en el impacto negativo del consumo energético intensivo. Las cinco grandes consecuencias mundiales del consumo energético moderno que examinaré han conllevado tanto mejoras muy deseables como efectos cuyo preocupante impacto puede observarse a escala local y global.

El crecimiento de la urbanización —desde 2007 más de la mitad de la humanidad vive en ciudades— ha sido una importante fuente de innovación. Ha mejorado la calidad de vida física y ofrece oportunidades educativas y culturales sin precedentes, aunque también ha causado niveles perjudiciales de contaminación del aire y el agua, un exceso de densidad de población y condiciones de vida horribles para los más pobres. Las sociedades energívoras disfrutan de un nivel de vida mucho más alto que sus predecesoras tradicionales, lo cual ha dado lugar a expectativas de mejora continuas, pero, debido a las persistentes (y a menudo profundas) desigualdades económicas, estos beneficios se han distribuido de manera poco equitativa; además, no

hay garantía de que las mejoras, que requieren cada vez más gasto, persistan a medida que la población envejece.

El precio de la energía, el comercio de combustibles y electricidad, y la seguridad del suministro energético se han convertido en importantes factores políticos tanto en países importadores como exportadores de energía; en particular, el precio alto o bajo del petróleo ha tenido importantes consecuencias para las economías muy dependientes de la exportación de hidrocarburos. La creciente capacidad destructiva de las armas y el riesgo cada vez más elevado de un conflicto nuclear con consecuencias ambientales y económicas verdaderamente globales han ido de la mano de un reconocimiento generalizado de la inutilidad de la guerra termonuclear y de medidas para reducir el riesgo real de conflictos. Y la combustión masiva de combustibles fósiles ha traído consigo muchos impactos ambientales negativos, sobre todo el riesgo de un rápido calentamiento global, si bien tenemos opciones efectivas para mitigar esta amenaza.

Urbanización

Las ciudades —incluso las grandes urbes— tienen una larga historia (Mumford, 1961; Chandler, 1987). La Roma del siglo I d. C. albergaba a más de medio millón de personas. La Bagdad de Harún al-Rashid de principios del siglo IX tenía 700.000 habitantes y la contemporánea Chang'an (la capital de la dinastía Tang), 800.000. Mil años después, Beijing, la capital de la dinastía Qing, superó el millón, y en 1800 había cerca de cincuenta ciudades por encima de 100.000 habitantes. No obstante, por aquel entonces incluso en Europa solo el 10% de la población vivía en ciudades. El rápido aumento posterior tanto de la población de las ciudades más grandes del mundo como de la proporción general de urbanitas habría sido imposible sin los combustibles fósiles. Las sociedades tradicionales solo podían mantener un pequeño número de grandes ciudades porque su energía tenía que provenir de tierras de cultivo y bosques

que fueran al menos cincuenta veces y comúnmente cien veces más extensos que el tamaño del propio asentamiento (recuadro 6.11).

El consumo de combustible de las ciudades modernas es mucho más eficiente, pero sus grandes centros de vivienda, industria y transporte empujan su densidad de potencia a 15 W/m^2 en áreas de clima cálido y, en ciudades industriales de clima más frío, hasta 150 W/m^2. Sin embargo, tanto el carbón como el petróleo que satisfacen esta demanda se extraen con densidades de potencia que suelen oscilar entre 1.000 y 10.000 W/m^2 (Smil, 2015b). Esto significa que una ciudad industrial depende de un yacimiento de carbón o petróleo cuyo tamaño se sitúe entre una séptima y una milésima parte de su superficie construida, así como de potentes motores primarios que transporten los combustibles desde su lugar de extracción hasta los usuarios. Mientras que las ciudades tradicionales tenían que apoyarse en la concentración de flujos de energía difusa obtenida en grandes áreas, las ciudades modernas se alimentan de la difusión de energías fósiles extraídas de manera concentrada en áreas relativamente pequeñas.

En lo que respecta a los alimentos, una ciudad moderna de 500.000 personas que consumen diariamente 11 MJ/cápita (un tercio de los cuales proviene de alimentos de origen animal que de media requieren cuatro veces su valor energético en pienso) solo necesita 70.000 ha de cultivo, incluso con un rendimiento medio bajo de solo 4 t/ha. Esto sería menos de la mitad del total que el ejemplo tradicional de ciudad. Por otro lado, los combustibles fósiles y la electricidad también hacen que la importación de alimentos a gran escala y larga distancia sea asequible. Y solo la electricidad y los combustibles líquidos para el transporte han hecho posible bombear agua potable, eliminar y tratar las aguas residuales y la basura, y satisfacer las necesidades de transporte y comunicación de las megalópolis (ciudades con más de 10 millones de habitantes). Todas las ciudades modernas son creaciones de flujos de energía fósil convertidos con altas densidades de potencia, pero las megalópolis baten récords

increíbles: una encuesta realizada por Kennedy *et al.* (2015) concluyó que en 2011 las 27 megalópolis del mundo (con menos del 7% de la población mundial) consumieron el 9% de la electricidad y el 10% de la gasolina mundiales.

RECUADRO 6.11

Densidades de potencia del suministro y el consumo energéticos urbanos tradicionales

Con una ingesta media de alimentos de 9 MJ/día/cápita proveniente, como en casi todas las dietas preindustriales, de manera abrumadora (90%) de alimentos vegetales, y rendimientos típicos de grano de solo 750 kg/ha, una ciudad tradicional de 500.000 habitantes habría necesitado 150.000 ha de tierras de cultivo. En un clima más frío, el consumo anual de combustible (leña y carbón) habría sido de 2 t/cápita. Si se hubiera abastecido de forma sostenida de bosques o arboledas con un rendimiento anual de 10 t/ha, se habrían necesitado 100.000 ha para abastecer de combustible a la ciudad. Una ciudad densa de ese tamaño ocupaba solo 2.500 ha y tenía que depender de un área cien veces mayor para su alimento y combustible.

En términos de densidad de potencia, este cálculo implica unos 25 W/m^2 para el consumo energético total y 0,25 W/m^2 para el suministro. El rango real de las densidades de potencia era bastante grande. Dependiendo de su consumo de alimentos, sus prácticas de cocinado y calefacción, el requerimiento energético de la pequeña manufactura y la eficiencia de las comunicaciones, el consumo energético total de las ciudades preindustriales era de 5-30 W/m^2 su superficie. La producción sostenible de combustible de bosques y arboledas cercanos rendía 0,1-1 W/m^2. En consecuencia, las ciudades tenían que depender de zonas cultivadas y boscosas entre 50 y 150 veces más grandes que su propio tamaño, y la ausencia de motores primarios potentes y baratos limitaba la capacidad de transportar alimentos y combustible desde regiones distantes, lo que ejercía presión sobre los recursos vegetales de las zonas circundantes (Smil, 2015b).

El surgimiento de ciudades alimentadas con combustibles fósiles (antes solo con carbón) fue rápido. En 1800 solo una de las diez

ciudades más grandes del mundo (Londres, la número dos) estaba en un país con un consumo energético dominado por el carbón. Un siglo después, nueve de las diez estaban en esa categoría: Londres, Nueva York, París, Berlín, Chicago, Viena, San Petersburgo, Filadelfia y Manchester, mientras que Tokio era la capital de un país en el que la biomasa todavía proporcionaba casi la mitad de la energía primaria (Smil, 2010a). La proporción mundial de población urbana en 1900 era solo del 15%, pero era mucho mayor en los tres mayores productores de carbón del mundo: un 70% en Reino Unido, un 50% en Alemania y un 40% en Estados Unidos. El posterior avance del crecimiento urbano también comportó un notable aumento del número total de ciudades muy grandes. En 2015, casi 550 aglomeraciones urbanas superaban el millón de habitantes, en comparación con trece en 1900 y solo dos, Pekín y el Gran Londres, en 1800 (City Population, 2015).

Los combustibles fósiles también dinamizaron las fuerzas de empuje y atracción de la migración: el crecimiento urbano siempre ha sido impulsado por el empuje de la mecanización agrícola y la atracción de la industrialización. La urbanización y la industrialización no son, por supuesto, sinónimos, pero ambos procesos han estado estrechamente relacionados por muchos vínculos que se amplifican mutuamente. Lo más notable es que la innovación técnica en Europa y América del Norte tuvo un origen abrumadoramente urbano, y las ciudades siguen siendo fuentes de innovación (Bairoch, 1988; Wolfe y Bramwell, 2008). Bettencourt y West (2010) llegaron a la conclusión de que cada vez que la población de una ciudad se duplica, la productividad económica crece un 130%, con un incremento de la productividad total y per cápita. Pan *et al.* (2013) atribuyeron este resultado en gran medida al «escalado superlinear», ya que el aumento de la densidad de la población urbana ofrece a los residentes mayores oportunidades de interacción cara a cara.

El desplazamiento masivo de empleos urbanos hacia el sector de los servicios es en gran medida un desarrollo posterior a la Segunda Guerra Mundial. En 2015 estas transferencias habían llevado a las poblaciones urbanas a más del 75% del total no solo en casi todos los países occidentales, sino también en Brasil y México (respectivamente 90% y 80%). Solo en muchos países de África y Asia la proporción de población urbana sigue siendo inferior al 50%: el 35% en la India, el 47% en Nigeria y el 55% en China. El porcentaje relativamente bajo de China se ha visto muy influido por décadas de migración estrictamente controlada en la China maoísta y el comienzo muy tardío de la urbanización rápida en la década de 1990. Los efectos económicos, sociales y ecológicos de estos grandes desplazamientos humanos son uno de los fenómenos más estudiados de la historia moderna. La miseria, la suciedad, las privaciones y las enfermedades comunes en las ciudades del siglo XIX dieron lugar a una literatura particularmente vasta: desde textos principalmente descriptivos (Kay, 1832) hasta textos muy críticos (Engels, 1845), pasando por audiencias parlamentarias o novelas de gran éxito (Dickens, 1854; Gaskell, 1855).

En muchas ciudades de Asia, África o América Latina hoy se observan realidades similares —sin la amenaza de la mayoría de enfermedades contagiosas, que ahora se eliminan por medio de la vacunación—. Pero la gente todavía migra. Ahora, como antes, suelen dejar atrás condiciones que, en conjunto, son aún peores, un hecho descuidado tanto por los escritos reformistas originales como por los debates posteriores sobre las desventajas de la urbanización. Ahora, como antes, hay que comparar el lamentable estado del entorno urbano —fealdad, contaminación del aire y el agua, ruido, hacinamiento, condiciones de vida terribles en barrios marginales— con su homólogo rural, a menudo no menos difícil.

Los problemas medioambientales rurales comunes incluyen concentraciones muy altas de contaminantes de aire interior (especialmente partículas finas) procedentes de la combustión de

biomasa sin ventilación, calefacción inadecuada en climas fríos, suministro de agua inseguro, higiene personal deficiente, deterioro y hacinamiento de la vivienda, y oportunidades mínimas o nulas de ofrecer una educación adecuada a los niños. Además, el trabajo de campo al aire libre rara vez es mejor que el peor trabajo no cualificado en una fábrica. En general, las tareas típicas de fábrica requieren un menor gasto energético que el trabajo agrícola común. Además, la duración de la jornada de trabajo fabril se reguló de manera razonable en un tiempo sorprendentemente corto tras el comienzo del empleo industrial urbano masivo.

Después vinieron salarios más altos y beneficios como el seguro médico y los planes de pensiones. Junto con mejores oportunidades educativas, estos cambios condujeron a una mejora apreciable del nivel de vida medio. Esto llevaron al surgimiento de una importante clase media urbana en todas las economías de mercado. El atractivo de este gran logro occidental, aunque hoy ciertamente empañado, se siente fuertemente en todo el mundo en vías de industrialización. Y sin duda fue un factor importante en la desaparición de los regímenes comunistas, que demostraron ser muy lentos a la hora de proporcionar beneficios similares. Por otro lado, no cabe duda de las consecuencias de la urbanización para el consumo energético: vivir en la ciudad requiere un aumento sustancial del suministro de energía per cápita, incluso en ausencia de industrias pesadas o grandes puertos; los combustibles fósiles y la electricidad necesarios para el traslado de una persona a una ciudad asiática en crecimiento puede ser fácilmente un orden de magnitud superior a la exigua cantidad de combustible de biomasa utilizada en su aldea de nacimiento para cocinar y (si es necesario) calentar una habitación.

Calidad de vida

El aumento del consumo energético ha ejercido un efecto generalmente gradual (o en ocasiones abrupto, como en la China post-1990) y en buena medida deseable sobre la calidad de vida media, un

término más amplio que el nivel de vida, pues también abarca variables intangibles clave como la educación y las libertades individuales. Durante las décadas de rápido crecimiento económico posteriores a la Segunda Guerra Mundial, muchos países pobres pasaron a la categoría de consumo energético intermedio a medida que su población mejoraba su calidad de vida general (aunque a menudo a cambio de la degradación ambiental concomitante), pero la distribución del consumo mundial de energía sigue siendo extremadamente sesgada. En 1950 solo 250 millones de personas (una décima parte de la población mundial) consumían más de 2 tep/año/cápita (84 GJ/año/cápita). Y, sin embargo, representaban el 60% del consumo de energía primaria del mundo (excluyendo la biomasa tradicional). En 2000 los porcentajes eran casi una cuarta parte de la humanidad y un consumo del 75% de los combustibles fósiles y la electricidad mundiales. Por el contrario, el cuarto más pobre de la humanidad utiliza menos del 5% de las energías comerciales (figura 6.18).

En 2015, gracias al rápido crecimiento económico chino, la proporción de la población mundial que consume más de 2 tep alcanzó el 40%, el mayor avance de igualación de la historia. Por muy sorprendentes que sean, estas estadísticas no captan la verdadera diferencia de calidad de vida media porque los países pobres dedican una parte mucho menor de su consumo energético total a usos domésticos y de transporte, y además convierten la energía de manera menos eficiente. La diferencia real en el consumo de energía directa per cápita entre los más ricos y más pobres del género humano está, por tanto, más cerca de cuarenta veces que «solo» veinte. Esta enorme disparidad es una de las principales causas de la brecha crónica entre desarrollo económico y calidad de vida en diferentes países. A su vez, esas desigualdades son una importante fuente de inestabilidad política mundial persistente.

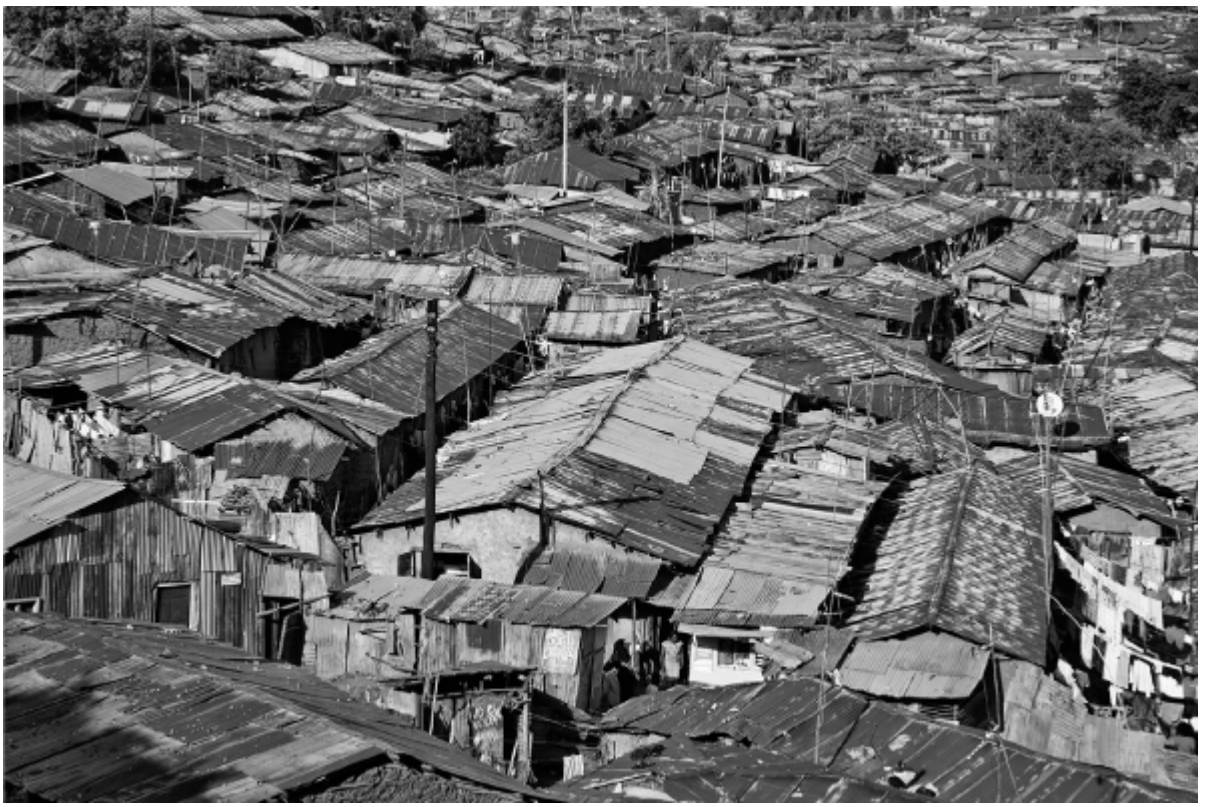


Figura 6.18 Kibera, una de las favelas más grandes de Nairobi (Corbis). El consumo de energía moderna per cápita en Kenya es de 20 GJ/año, pero los habitantes de los barrios marginales de África y Asia consumen solo 5 GJ/año, es decir, menos del 2% de la media de Estados Unidos.

Los países que han logrado entrar en la categoría de consumo intermedio han pasado por etapas similares de progreso, aunque a un ritmo muy diferente: lo que a los primeros países industrializados de Europa occidental les llevó dos o incluso tres generaciones se ha logrado recientemente en Corea del Sur y China en una sola generación de desarrollo comprimido (una ventaja de los arranques tardíos llevados a cabo con determinación). En las primeras etapas del desarrollo económico los beneficios son limitados porque los combustibles y la electricidad se utilizan de manera abrumadora para construir una base industrial. El lento aumento de la adquisición de bienes de consumo y la mejora de la dieta básica es uno de los primeros signos de mejora, que empieza en las ciudades y llega gradualmente al campo.

Entre las primeras ventajas se encuentran una mayor variedad y mejor calidad de los utensilios básicos de cocina, platos y cubiertos; más (y generalmente más coloridas) piezas de ropa; mejores zapatos; mejor higiene personal (lavado personal y de ropa más frecuente); compra de muebles adicionales; compra de pequeños regalos para ocasiones especiales; y cuadros (comenzando con reproducciones baratas) en las paredes. En la América del Norte y la Europa de principios del siglo XX, la posesión de una gama cada vez más amplia de aparatos eléctricos se produjo durante la etapa de *embourgeoisement* [en francés en el original], pero el bajo coste de los nuevos aparatos y dispositivos eléctricos (aire acondicionado, hornos microondas, televisores) y electrónicos (sobre todo teléfonos móviles) hace que en muchos países asiáticos y en algunos africanos las familias los adquieran incluso antes de poseer mejores artículos domésticos.

En la siguiente etapa se observan nuevas mejoras en la variedad y calidad del suministro de alimentos y la atención sanitaria, y el progreso comienza a extenderse al campo. El nivel educativo de la población urbana aumenta y hay cada vez más indicios de una incipiente afluencia, como la propiedad de automóviles, nuevas comodidades en las casas y viajes al extranjero para las personas con más ingresos. Una vez más, algunos de estos beneficios se han combinado o invertido recientemente, en particular en Asia. Eventualmente, llega la etapa de consumo masivo, con sus numerosas comodidades físicas y frecuentes despliegues ostentosos. La prolongación de la escolaridad, la alta movilidad personal y los crecientes gastos en ocio y salud forman parte de este cambio.

La correlación de esta secuencia con el promedio de consumo energético per cápita ha sido inconfundible, pero la variable que se suele comparar —el promedio de consumo per cápita calculado mediante la agregación del suministro de energía primaria de un país y su división por el total de la población— no es forzosamente la mejor. El consumo medio per cápita del suministro total de energía primaria no dice nada ni sobre el desglose del consumo (los militares pueden

representar un consumo desproporcionadamente elevado, como en la URSS, Corea del Norte o Pakistán) ni sobre la eficiencia típica (o media) de las conversiones de energía (más alta y, por tanto, con más servicios finales por unidad de energía bruta en Japón que en la India). La comparación de la tasa media de consumo energético en los hogares sería mejor, pero tampoco es una variable perfecta: los combustibles y la electricidad consumidos por los hogares excluyen el considerable consumo energético indirecto necesario para construir casas o fabricar automóviles, electrodomésticos, aparatos electrónicos y muebles.

Teniendo todo esto en cuenta, y comprendiendo que las peculiaridades nacionales (desde las singularidades climáticas hasta las económicas) impiden cualquier clasificación simple, la relación entre consumo energético y calidad de vida puede dividirse en tres categorías básicas. Ningún país cuyo consumo energético primario comercial anual (dejando de lado los biocombustibles tradicionales) sea inferior a 5 GJ/cápita (es decir, 120 kep) puede garantizar siquiera las necesidades básicas a sus habitantes. En 2010 Etiopía seguía estando muy por debajo de ese mínimo y Bangladesh apenas por encima; China lo alcanzó antes de 1950, igual que casi toda Europa occidental antes de 1800.

A medida que el consumo de energía comercial se acerca a 1 tep (42 GJ), la industrialización se consolida, los ingresos aumentan y la calidad de vida mejora notablemente. China durante la década de 1980, Japón durante la década de 1930 y después en la de 1950, y Europa occidental y Estados Unidos entre 1870 y 1890 son ejemplos de esta etapa de desarrollo. La riqueza incipiente requiere, incluso con un consumo bastante eficiente de energía, al menos 2 tep (84 GJ) per cápita por año. Francia alcanzó esta tasa durante la década de 1960 y Japón durante la década de 1970. China la alcanzó en 2012, aunque no es un caso totalmente comparable con los demás porque gran parte de su consumo energético sigue yendo a la industria (el 30% en 2013) y muy poco al consumo privado (AIE, 2015a).

En cualquier caso, tanto el progreso francés como el chino ilustran la velocidad de los cambios recientes. El censo francés de 1954 revela sorprendentes deficiencias de vivienda: menos del 60% de los hogares tenían agua corriente, solo el 25% tenían un retrete interior y solo el 10% tenían un baño y calefacción central (Prost, 1991). A mediados de la década de 1970, el 90% de los hogares tenía nevera, el 75% inodoros, el 70% un baño y el 60% calefacción central y lavadora. En 1990 todas estas comodidades eran virtualmente universales y tres de cada cuatro familias también poseían un coche (en comparación con menos del 30% en 1960). Esta creciente riqueza tenía que reflejarse en un aumento del consumo energético. Entre 1950 y 1960, el consumo energético medio per cápita en Francia aumentó un 25%; entre 1960 y 1974 se disparó más del 80%; y si entre 1950 y 1990 el suministro de combustibles per cápita se duplicó con creces, el consumo de gasolina se multiplicó por seis y el de electricidad, por más de ocho (Smil, 2003).

En China el cambio ha sido aún más rápido. En 1980, cuando comenzaron las reformas económicas (cuatro años después de la muerte de Mao Zedong), el consumo energético per cápita era de 19 GJ; en 2000 era de 35 GJ; en 2010, después de cuadruplicarse en tres décadas, era de 75 GJ; y en 2015 superaba los 90 GJ (Smil, 1976; China Energy Group, 2015), un nivel comparable a la media española a principios de la década de 1980. Buena parte de esta energía se ha utilizado en la construcción. Este dato lo ilustra perfectamente: China consumió más cemento (4,9 Gt) en nuevos proyectos de construcción entre 2008 y 2010 (en tan solo tres años) que a lo largo de todo el siglo XX (4,5 Gt) (Smil, 2014b). No es de extrañar que el país tenga ahora la mayor red moderna de ferrocarriles de alta velocidad y autopistas interprovinciales del mundo.

Ninguna otra forma de energía ha tenido mayor impacto en la mejora de la calidad de vida que el suministro asequible de electricidad. En el plano personal, los efectos han sido generalizados y han alargado la esperanza de vida: los bebés prematuros se mantienen

en incubadoras, las vacunas que se les inoculan se guardan en neveras, las enfermedades peligrosas se diagnostican mediante técnicas no invasivas a tiempo para ser tratadas, los enfermos graves se conectan a monitores electrónicos, etc. En el plano social, uno de los efectos más importantes de la electricidad ha sido la transformación de muchas tareas domésticas y, por tanto, de la vida de las mujeres. Este cambio es bastante reciente incluso en el mundo occidental.

Durante generaciones, el aumento del consumo energético no facilitó las tareas domésticas diarias. De hecho, a veces incluso las hizo más difíciles. A medida que las normas de higiene y las expectativas sociales aumentaban con una mejor educación, el trabajo de las mujeres en los países occidentales a menudo se volvía más duro. En la década de 1930 las tareas domésticas todavía eran durísimas tanto en los pequeños apartamentos ingleses (Spring-Rice, 1939) como en las granjas estadounidenses. Fue la electricidad la que liberó a las mujeres de ese trabajo. Independientemente de la disponibilidad de otras formas de energía, la electricidad fue la única que logró eliminar el trabajo agotador y a menudo peligroso (Caro, 1982; recuadro 6.12).

En 1900 ya se habían inventado muchos aparatos eléctricos. Durante la década de 1890, General Electric vendía planchas eléctricas, ventiladores y un serpentín calentador de agua que podía hervir 0,5 l de agua en 12 minutos (Electricity Council, 1973). El elevado precio de estos aparatos, el cableado doméstico limitado y el progreso lento de la electrificación rural retrasaron su adopción generalizada, tanto en Europa como en América del Norte, hasta la década de 1930. La refrigeración ha sido una innovación incluso más importante que la cocina de gas o eléctrica (Pentzer, 1966). Las primeras neveras para el hogar fueron comercializadas por Kelvinator en 1914, aunque su expansión no tuvo lugar hasta la década de 1940 en Estados Unidos y 1960 en Europa. Su importancia ha ido en aumento con la creciente dependencia de la comida rápida, de tal manera que ahora representa hasta el 10% de toda la electricidad consumida en los hogares de los países ricos.

El uso de la electricidad en las tareas domésticas sigue generando ahorro de tiempo y mano de obra en los países ricos. Los hornos autolimpiables, los procesadores de alimentos y los microondas (desarrollados en 1945 y transformados en pequeños modelos domésticos a finales de la década de 1960) se han convertido en algo común en el mundo desarrollado. La propiedad de neveras, lavadoras y microondas también se ha generalizado entre los segmentos más acomodados de la población asiática y latinoamericana, así como los sistemas de aire acondicionado. Patentado por Willis Carrier (1876-1950) en 1902, durante décadas el aire acondicionado se limitó a aplicaciones industriales. Las primeras unidades pequeñas para uso doméstico se produjeron en la década de 1950 en Estados Unidos, y su adopción generalizada abrió el Cinturón del Sol (*Sun Belt*) estadounidense a la migración masiva desde los estados septentrionales y aumentó el atractivo de los destinos turísticos subtropicales y tropicales (Basilea, 2014). Hoy en día el uso del aire acondicionado también se ha generalizado en las áreas urbanas de los países de clima cálido, siendo la mayoría de ellos unidades de pared de una sola habitación (figura 6.19).

RECUADRO 6.12

La importancia de la electricidad en la facilitación del trabajo doméstico

El efecto liberador de la electricidad está perfectamente ilustrado en el primer volumen de la biografía de Lyndon Johnson de Robert Caro (1982). Como señala Caro, lo que hacía que la vida en el condado de Hill, en Texas, fuera tan dura no era la escasez de energía (los hogares tenían mucha madera y queroseno), sino la ausencia de electricidad. Caro relata de manera conmovedora —casi físicamente dolorosa— el trabajo pesado y el peligro que suponía planchar con pesadas cuñas de metal calentadas en estufas de leña, lavar y dar de comer a los animales, moler los alimentos, talar la madera, y bombear y transportar agua para cocinar continuamente. Estas tareas, que recaían principalmente en las mujeres, eran mucho más exigentes que el típico

requisito de mano de obra de los países pobres, ya que los agricultores del condado de Hill en los años treinta se esforzaban por mantener un nivel de vida mucho más alto y llevar a cabo operaciones agrícolas mucho más grandes que los campesinos de Asia o América Latina. Por ejemplo, el consumo de agua para una familia de cinco personas ascendía a 300 t/año y el abastecimiento requería el equivalente a más de 60 días de 8 h y caminar 2.500 km. Por consiguiente, no es sorprendente que nada haya sido tan revolucionario en la vida de estas personas como la extensión de las líneas de transmisión.

Las sociedades modernas han elevado el crecimiento económico, y, por tanto, el aumento del consumo energético, a la categoría de dogma, asumiendo implícitamente que consumir más siempre conlleva una recompensa. Pero el crecimiento económico y el aumento del consumo energético deben considerarse únicamente como medios para alcanzar una mejor calidad de vida, concepto que incluye no solo la satisfacción de las necesidades físicas básicas (salud, nutrición), sino también el desarrollo del intelecto humano (que cubre desde la educación básica hasta las libertades individuales). Este concepto intrínsecamente multidimensional no puede ser resumido con un único indicador representativo, pero resulta que solo unas pocas variables sirven como marcadores sensibles.

Figura 6.19 Un edificio de apartamentos en Shanghái con aire acondicionado en casi todas las habitaciones (Corbis).

La mortalidad infantil (muertes/1.000 nacidos vivos) y la esperanza de vida al nacer son dos indicadores obvios e inequívocos de calidad de vida física. La mortalidad infantil es un excelente indicador de variables como el ingreso disponible, la calidad de la vivienda y la nutrición, el nivel de educación y la inversión del Estado en salud: muy pocos bebés mueren en países donde las familias viven en buenas viviendas y donde padres bien educados y alimentados a su vez los alimentan adecuadamente y tienen acceso a atención médica.

Y, naturalmente, la esperanza de vida cuantifica los efectos a largo plazo de estos factores críticos. Los datos sobre educación y alfabetización no son tan reveladores: las tasas de matriculación nos hablan de acceso, pero no de calidad, y en la mayoría de países no existen estudios detallados sobre el rendimiento, como el informe PISA (Programme for International Student Assessment) de la OCDE. Otra opción es utilizar el Índice de Desarrollo Humano (IDH) del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), que combina la esperanza de vida al nacer, la alfabetización de los adultos, la matrícula educativa combinada y el PIB per cápita.

La comparación de estas medidas con el consumo energético medio conduce a algunas conclusiones importantes. Algunas sociedades han generado una dieta adecuada, atención sanitaria y escolarización básicas y una calidad de vida decente con un consumo energético anual de solo 40-50 GJ/cápita. Una mortalidad infantil relativamente baja (<20/1.000 recién nacidos), una esperanza de vida femenina relativamente alta (>75 años) y un IDH superior a 0,8 pueden alcanzarse con 60-65 GJ/cápita, mientras que las mejores tasas del mundo (mortalidad infantil de <10/1.000 recién nacidos, esperanza de vida femenina >80 años e IDH >0,9) requieren al menos 110 GJ/cápita. No hay una mejora perceptible en la calidad de vida fundamental por encima de ese nivel.

Así pues, el consumo energético está relacionado con la calidad de vida de manera lineal solo durante las primeras etapas del desarrollo (desde la calidad de vida en Níger hasta la calidad de vida en Malasia). Las estadísticas muestran una inflexión clara de la mejor línea de ajuste entre 50 y 70 GJ/cápita, seguida de un retorno decreciente y coronada por una meseta encima (dependiendo de la variable de calidad de vida estudiada) de 100-120 GJ/cápita (figura 6.20). Esto significa que el efecto del consumo energético en la mejora de la calidad de vida —medido utilizando variables que importan de verdad y no la propiedad de yates u otras tonterías— se desvanece a un nivel de consumo energético muy inferior al de los países ricos: 150

GJ/cápita en Japón y las principales economías de la Unión Europea, 230 GJ/cápita en Australia, 300 GJ/cápita en Estados Unidos y 385 GJ/cápita en Canadá en 2015 (BP, 2015). El aumento de consumo energético adicional se destina a viviendas ostentosas (aunque el tamaño medio de las familias en Estados Unidos ha disminuido, el de las casas se ha duplicado con creces desde la década de 1950), la propiedad de múltiples vehículos caros y los vuelos frecuentes.

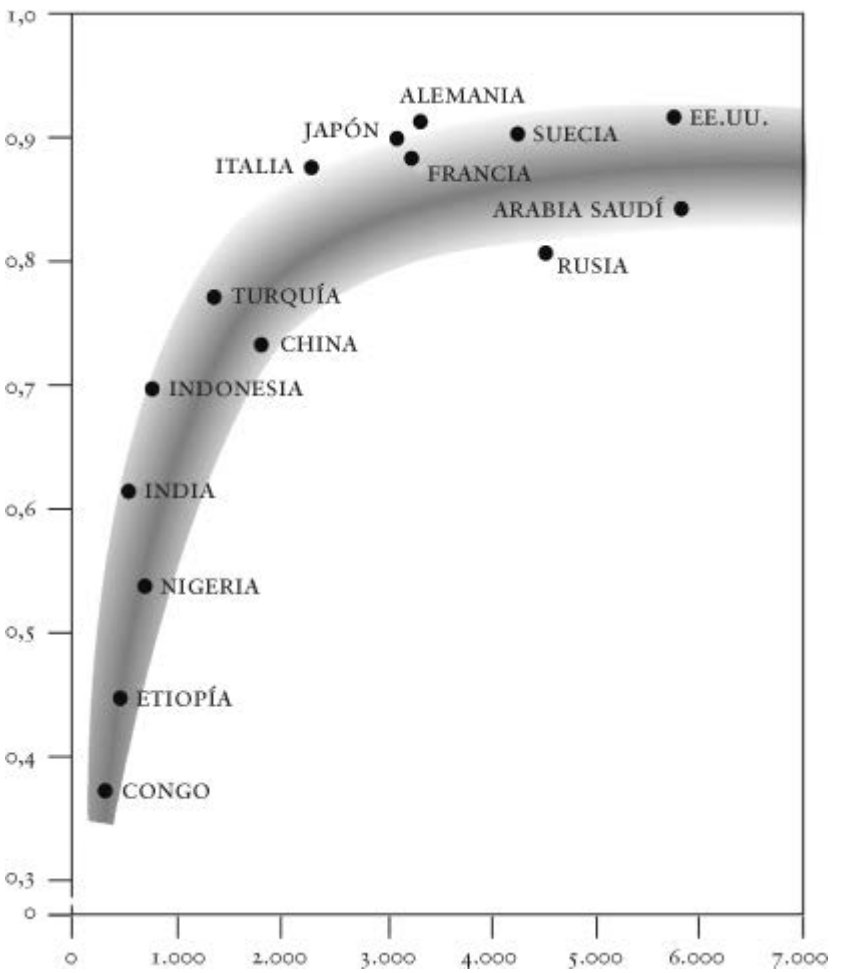


Figura 6.20 Consumo energético medio per cápita e IDH en 2010. Fuentes: PNUD (2015) y Banco Mundial (2015a).

Lo más notable es que el elevado consumo energético en Estados Unidos ha ido acompañado de indicadores de calidad de vida inferiores no solo a los de Japón o los principales países de la UE, cuyo consumo energético es solo la mitad que el de Estados Unidos,

sino a los de muchos países con un consumo energético intermedio. En 2013, en Estados Unidos 6,6 de cada 1.000 bebés nacidos vivos murieron durante su primer año de vida. Esta tasa de mortalidad infantil equivale al puesto 31 a nivel mundial; es mucho más alta que la de Francia (3,8), Alemania (3,5) y Japón (2,6) e incluso más que dobla la de Grecia (CDC, 2015). Peor aún, en 2013 Estados Unidos ocupaba el puesto 36 en la clasificación de esperanza de vida a nivel mundial, con una media de 79,8 años, prácticamente igual que la Cuba de Castro (79,4) y por detrás de Grecia, Portugal y Corea del Sur (OMS, 2015a).

El informe PISA evalúa regularmente el nivel educativo de los estudiantes de los países de la OCDE. Los últimos resultados muestran que los resultados de los jóvenes de 15 años de Estados Unidos están justo por debajo de los de Rusia, Eslovaquia y España y muy por debajo de los adolescentes alemanes, canadienses o japoneses (PISA, 2015). Los niños estadounidenses están justo debajo de la media de la OCDE (497 frente a 501) en ciencias y apenas por encima de la media (498 frente a 496) en lectura, y desde luego muy por detrás de todos los grandes países ricos occidentales. Como cualquier otro estudio de este tipo, el informe PISA tiene sus puntos débiles, pero las grandes diferencias en las clasificaciones relativas son claras: no hay el más mínimo indicio de que el elevado consumo energético de Estados Unidos tenga algún tipo de efecto positivo en el nivel educativo del país.

Implicaciones políticas

La dependencia de las sociedades modernas respecto al suministro continuo, barato, fiable y masivo de electricidad y combustibles fósiles ha generado multitud de preocupaciones y respuestas políticas tanto en el plano nacional como internacional. Tal vez la fuente de preocupación más generalizada sea la concentración de poder en manos de gobiernos, empresas o ejércitos. Como explica Adams (1975: 120-121), «cuantos más flujos energéticos y fuentes de energía

existen en una sociedad, más tiende a concentrarse su control en manos de unos pocos, de tal manera que menos decisiones tienen cada vez mayores consecuencias energéticas».

No obstante, el peligro es mucho mayor cuando el control está superconcentrado en un único individuo que decide utilizar su poder de manera agresiva y destructiva. En este caso, cualquier error puede generar muchísimo sufrimiento humano, un desperdicio prodigioso de mano de obra y recursos, una gravísima degradación del medio ambiente o la destrucción de patrimonio cultural. La historia está repleta de ejemplos de excesiva concentración de poder. Medidas en vidas humanas, las decisiones tomadas por los reyes españoles del siglo XVI, Napoleón Bonaparte (1769-1821), el emperador Guillermo II (1859-1941) o Adolf Hitler (1889-1945) provocaron millones de muertes. La conquista española de las Américas condujo directa (guerras, esclavitud) e indirectamente (enfermedades infecciosas, hambrunas) a la muerte de decenas de millones de personas (López, 2014); la guerra sin fin de Napoleón costó 2,5-5 millones de vidas (Gates, 2011); la agresión prusiana acabó causando 17 millones de muertes durante la Primera Guerra Mundial; y el total de muertes de la Segunda Guerra Mundial, militares y civiles, se acercó a los 50 millones (War Chronicle, 2015).

Con todo, las decisiones de Lenin y Stalin, los dos dictadores comunistas que pudieron convertir sus obsesiones en terribles realidades, utilizando para ello ingentes flujos de electricidad y combustibles fósiles, son un epítome insuperable del peligro de la concentración de poder. En 1953, el año de la muerte de Stalin, el consumo energético de la URSS era más de 25 veces el total de 1921, cuando el país salió de su guerra civil (Clarke y Dubravko, 1983). Sin embargo, la paranoia del generalísimo condujo a la muerte de decenas de millones de personas en purgas masivas, al reasentamiento de poblaciones enteras (tártaros de Crimea, alemanes del Volga, chechenos), al imperio del gulag y a la postración económica del país potencialmente más rico del mundo. El número total de muertes

nunca se conocerá con exactitud, pero es al menos de 15-20 millones (Conquest, 2007).

De manera similar, cuando murió Mao Zedong, en 1976, la producción de energía china era veinte veces superior a la de 1949 (Smil, 1988). Pero los delirios del Gran Timonel trajeron consigo sucesivas olas de muerte durante el Gran Salto Adelante, seguidas de la peor hambruna de la historia de la humanidad —entre 1959 y 1961 murieron más de 30 millones de chinos (Yang, 2012)— y toda la destrucción que supuso la Revolución Cultural. Una vez más, nunca tendremos un número exacto, pero el total de muertes del periodo 1949-1976 podría rondar los 50 millones (Dikötter, 2010). Y aunque la probabilidad de guerra nuclear entre grandes potencias se ha reducido gracias al desmantelamiento de los arsenales de cabezas nucleares estadounidenses y rusos, todavía no es nula, y la decisión de iniciarla depende, en ambos lados, de un grupo muy reducido de personas.

No existe mejor ejemplo de las consecuencias políticas y económicas mundiales de la excesiva concentración de poder sobre los flujos de energía que las decisiones adoptadas por la Organización de Países Exportadores de Petróleo desde 1973. Dada la importancia del petróleo en la economía moderna y el dominio del mercado mundial de exportación por parte de unos pocos países de Oriente Medio, cualquier decisión tomada por unos pocos individuos, en particular los saudíes, que, dada su enorme capacidad de producción de petróleo, controlan las decisiones de la OPEP, tiene profundas consecuencias para la prosperidad mundial. El descontento de la OPEP por los ingresos bajos y la consiguiente quintuplicación de los precios mundiales del petróleo en 1973-1974, así como su ulterior casi cuadruplicación en 1979-1980, dio paso a (y luego profundizó) un periodo de depresión económica mundial caracterizado por una elevada inflación y un crecimiento económico significativamente reducido (Smil, 1987; Yergin, 2008).

En respuesta, los principales importadores occidentales y Japón establecieron acuerdos de emergencia para compartir energía coordinados por la Agencia Internacional de la Energía, ordenaron el establecimiento de reservas estratégicas de petróleo (algunos países también promovieron el establecimiento de vínculos bilaterales más estrechos con los países de la OPEP) y financiaron la búsqueda de la autonomía energética nacional mediante la inversión en fuentes de energía alternativas. El desarrollo de la electricidad nuclear por parte de Francia y la estrategia japonesa de sobriedad energética han sido especialmente notables y eficaces. Pero el rápido crecimiento económico de China —importador neto de petróleo desde 1994— y el descenso de la producción de los yacimientos petrolíferos tradicionales, tanto en Alaska como en el mar del Norte, fueron las principales razones de otro aumento del precio mundial del petróleo hasta un nivel récord de 145 dólares por barril en julio de 2008, ascenso que solo terminó con la crisis económica de otoño de 2008, que llevó el precio del barril a apenas 30 dólares en diciembre de 2008.

Cuando las economías se recuperaron, y gracias al crecimiento continuo de la demanda china, el precio del petróleo volvió a superar los 100 dólares por barril en julio de 2014. Sin embargo, poco después la caída de la demanda y el aumento de la oferta (principalmente debido al resurgimiento de Estados Unidos como primer productor mundial, gracias al rápido crecimiento de la producción de gas de esquisto por fracturación hidráulica) provocaron un profundo retroceso. Pero con una diferencia clave: para proteger la cuota de mercado mundial del país, los dirigentes saudíes decidieron seguir produciendo al máximo de su capacidad, en lugar de, como en el pasado, recortar la producción y subir el precio. Una vez más, las decisiones tomadas por unas pocas personas tienen consecuencias mundiales para la estabilidad política de los países que dependen en gran medida de las exportaciones de petróleo, así como para los

principales productores de petróleo no pertenecientes a la OPEP, incluidos Estados Unidos y Canadá.

La caída del precio del petróleo ha generado la expectativa de que la OPEP pueda desaparecer, pero las peculiaridades de la distribución sumamente desigual de las reservas de petróleo (una de las principales preocupaciones geoestratégicas del siglo XX que no ha perdido su importancia en el siglo XXI) siguen favoreciendo a los productores de Oriente Medio. La cuenca del golfo Pérsico no tiene parangón: tiene doce de los quince campos petrolíferos más grandes del mundo, y en 2015 contenía el 65 % de las reservas mundiales de petróleo líquido (BP, 2015). Esta riqueza explica el inmenso interés que existe en la estabilidad de la región. Pero esta estabilidad es tremendamente complicada debido al desorden casi crónico de la zona, que está compuesta por Estados artificiales separados por fronteras arbitrarias que atraviesan grupos étnicos antiguos y contienen complejas enemistades religiosas.

Las intervenciones extranjeras más importantes en la región tras la Segunda Guerra Mundial comenzaron con el intento soviético de apoderarse del norte de Irán (1945-1946). Los estadounidenses aterrizaron dos veces en Líbano, en 1958 y 1982, pero su determinación se vio quebrantada por un atentado terrorista con bomba en los cuarteles de Beirut en 1983 (Hammel, 1985). Los países occidentales armaron fuertemente a Irán (hasta 1979, durante la última década del reinado del sah Reza Pahleví) y Arabia Saudita, y los soviéticos hicieron lo mismo con Egipto, Siria e Irak. El apoyo occidental (con armas, inteligencia y crédito) benefició a Irak durante la guerra entre Irak e Irán (1980-1988). La serie de intervenciones culminó con las operaciones Escudo del Desierto y Tormenta del Desierto de 1990-1991, una respuesta firme de la alianza liderada por Estados Unidos y sancionada por la ONU para acabar con la invasión iraquí de Kuwait (CMI, 2010).

Con este movimiento, Irak duplicó sus reservas de petróleo, que pasaron a representar el 20% del total mundial. El avance iraquí

amenazaba seriamente los campos petrolíferos saudíes, muy cercanos, y quizás incluso la propia existencia de la monarquía, que controlaba una cuarta parte de las reservas mundiales de petróleo. Después de la derrota Sadam Husein permaneció en el poder, y tras los acontecimientos del 11 de septiembre los temores de una nueva agresión (fuera de lugar, como se demostró más tarde al no encontrarse armas de destrucción masiva en Irak) condujeron a la ocupación estadounidense del país en marzo de 2003 y posteriormente a años de violencia interna y la eventual pérdida de parte del territorio en favor del llamado Estado islámico. Más adelante argumentaré, junto con Lesser (1991), que los objetivos relacionados con los recursos, aparentemente tan importantes en los conflictos de Oriente Medio, han estado históricamente determinados por objetivos estratégicos más amplios y no al revés. Y el fracaso de las naciones árabes de la OPEP a la hora de convertir el petróleo en un arma política (promulgando un embargo de petróleo contra Estados Unidos y Holanda a raíz de la guerra árabe-israelí del Yom Kipur de octubre de 1973) no fue el primer caso de uso del suministro energético como vehículo de mensajes ideológicos.

El poder simbólico de la luz eléctrica fue explotado por actores tan diversos como las grandes empresas estadounidenses y el partido nazi alemán. Los industriales estadounidenses mostraron por primera vez el poder de la luz durante la Exposición Mundial Colombina de 1894 en Chicago, y luego inundando los barrios bajos de las grandes ciudades con «vías blancas» (Nye, 1992). Los nazis utilizaron muros de luz para asombrar a los participantes de las concentraciones masivas del partido en la década de 1930 (Speer, 1970). La electrificación se convirtió en la encarnación de ideales políticos tan dispares como el Estado comunista de Lenin y el New Deal de Franklin Roosevelt. Lenin resumió su ambición en un eslogan («El comunismo es el poder soviético más la electrificación de todo el país») y la predilección soviética por la construcción de proyectos hidroeléctricos gigantescos se mantuvo viva después de la desaparición

de la URSS en la China post-Mao. Por su parte, Roosevelt utilizó la participación federal en la construcción de presas y la electrificación del campo como medio de recuperación económica también en las regiones más atrasadas del país (Lilienthal, 1944).

Armas y guerras

La fabricación de armas se ha convertido en una actividad industrial de primer orden y fuertemente apoyada por la investigación avanzada, de tal manera que todas las grandes economías del mundo también son grandes exportadoras de armamento. Solo una fracción de este gasto puede justificarse por necesidades reales de seguridad. En realidad, la historia de la adquisición de armas modernas está marcada por el despilfarro y la mala asignación de inversión y mano de obra cualificada; en particular, el desarrollo de armas irrelevantes para las nuevas formas de guerra: es difícil de justificar que la compra de enormes tanques constituya una respuesta inteligente al terrorismo yihadista. No es de sorprender que muchos avances técnicos vinculados con el uso de nuevos combustibles y motores primarios se adaptaran rápidamente para usos destructivos. Primero aumentaron el poder y la eficacia de las técnicas existentes, después posibilitaron el diseño de nuevos tipos de armas con un alcance, una velocidad y un poder de destrucción sin precedentes.

El punto culminante de esta historia fueron la acumulación de enormes arsenales nucleares y el despliegue de misiles balísticos intercontinentales capaces de alcanzar cualquier objetivo en la Tierra. La aceleración de la capacidad de destrucción de las armas modernas queda patente al contrastar las armas típicas de mediados de los siglos XIX y XX con sus predecesoras de solo medio siglo atrás. Los dos principales tipos de armas utilizados durante la guerra civil estadounidense (1861-1865), los mosquetes de infantería y los cañones de 12 libras (ambos con carga de boca y ánima lisa), habrían resultado bastante familiares para los veteranos de las guerras napoleónicas (Mitchell, 1931). Por el contrario, de las armas que

dominaron los campos de batalla de la Segunda Guerra Mundial —tanques, aviones de caza y bombarderos, portaaviones y submarinos—, durante la década de 1890 solo existían los submarinos (en fase experimental temprana). Una manera reveladora de entender la dimensión energética de este desarrollo es comparar el poder cinético y explosivo real de las armas más utilizadas.

Como base para el primer tipo de comparación, es útil recordar (como se explica en el capítulo 4) que la energía cinética de las dos armas de mano más comunes de la era preindustrial, las flechas (disparadas con arcos) y las espadas, era solo del orden de 10^1 J (generalmente 15-75 J), y que la flecha de una ballesta pesada podía dar en un blanco con 100 J de energía cinética. Las balas disparadas desde las bocas de mosquetes y rifles, en cambio, tenían una energía cinética del orden de 10^3 J (10-100 veces más elevadas), y los proyectiles disparados por cañones modernos (incluidos los cañones montados en tanques) una energía del orden de 10^6 J. El recuadro 6.13 muestra el cálculo preciso para media docena de armas: los valores de los proyectiles de cañones solo representan la energía cinética de los proyectiles y excluyen la energía de los explosivos que pueden o no llevar consigo.

Los cohetes y misiles, propulsados por combustibles sólidos o líquidos, causan la mayor parte de su daño por la explosión de sus ojivas, no por su energía cinética, pero, aun así, cuando los primeros misiles alemanes V-1 (no guiados) de la Segunda Guerra Mundial no explotaban, la energía cinética de su impacto era de 15-18 MJ. Y desde luego el ejemplo reciente más famoso de objeto con alta energía cinética utilizado para infligir un daño extraordinario fue el choque de dos grandes aviones Boeing (767 y 757) contra los rascacielos del World Trade Center por parte de terroristas yihadistas el 11 de septiembre de 2001. En realidad, las Torres Gemelas fueron diseñadas para poder absorber el impacto de un avión de pasajeros, pero solo un Boeing 707 volando despacio (80 m/s) que hubiera podido perderse en su aproximación al aeropuerto de Newark, La Guardia o JFK. El

Boeing 767-200 es solo un 15% más pesado que el 707, pero, al chocar a no menos de 200 m/s, su velocidad cinética fue más de seis veces mayor (2,5 GJ contra 400 MJ).

Aun así, las Torres no fueron derribadas por el impacto, ya que los aviones actuaron como balas que golpean un árbol pesado: no pudieron empujar la estructura, pero sí penetrarla y destruir primero las columnas exteriores. Karim y Fatt (2005) demostraron que el 46% de la energía cinética inicial del avión se transformó en daño directo a las columnas exteriores, que no se habrían derruido si hubieran tenido un grosor mínimo de 20 mm. El colapso de las torres fue causado por la quema de combustible (más de 50 t de queroseno, o 2 TJ) y por los gases de combustión del interior del edificio, que causaron el debilitamiento térmico del acero estructural y el calentamiento no uniforme de las vigas del suelo, lo que precipitó el colapso escalonado del suelo y provocó una velocidad de caída libre, ya que las torres cayeron en solo 10 s (Eagar y Musso, 2001).

RECUADRO 6.13

La energía cinética de los proyectiles propulsados por explosivos

Arma	Proyectil	Energía cinética (J)
Mosquete de la guerra civil estadounidense	Bala	1×10^3
Rifle de asalto (M16)	Bala	2×10^3
Cañón del siglo XVIII	Bola de hierro	300×10^3
Artillería de la Primera Guerra Mundial	Obús de metralla	1×10^6
Arma pesada antiaérea de la Segunda Guerra Mundial	Obús altamente explosivo	6×10^6
Tanque M1A1 Abrams	Obús de uranio empobrecido	6×10^6

El poder explosivo de las armas modernas comenzó a aumentar con la invención de compuestos más potentes que la pólvora que también se autooxidan, pero cuya elevada velocidad de detonación crea una onda de choque. Esta nueva clase de productos químicos se preparaba mediante la nitración de compuestos orgánicos como la celulosa, la glicerina, el fenol y el tolueno (Urbanski, 1967). Ascanio Sobrero preparó nitroglicerina en 1846 y J. F. E. Schultze introdujo la nitrocelulosa en 1865, pero el uso práctico de la nitroglicerina solo fue posible gracias a dos inventos de Alfred Nobel: la mezcla del compuesto con diatomita (una sustancia porosa inerte) para crear dinamita y la introducción de un detonador práctico, el encendedor Nobel (Fant, 2014).

Dependiendo de la composición, la velocidad de detonación de la pólvora puede ser de solo unos pocos cientos de m/s, mientras que la de la dinamita es de hasta 6.800 m/s. El trinitrotolueno (TNT) fue sintetizado por Joseph Wilbrand en 1863 y fue utilizado como explosivo (velocidad de detonación de 6.700 m/s) a finales del siglo XIX, mientras que el explosivo prenuclear más potente, la ciclonita (ciclotrimetilentrinitramina o RDX, Royal Demolition eXplosive, velocidad de detonación de 8.800 m/s), fue fabricado por primera vez por Hans Henning en 1899. Desde entonces, estos explosivos se han utilizado en cañones, minas, torpedos y bombas, y en las últimas décadas también se han atado al cuerpo de terroristas suicidas. Pero muchos ataques terroristas con coches y camiones bomba se han hecho con una mezcla de nitrato de amonio (un fertilizante común) y fueloil: el ANFO está compuesto en un 94% de NH_4NO_3 (como agente oxidante) y un 6% de fueloil, ambos ingredientes fáciles de conseguir y cuyo efecto resulta sobre todo de la masa del explosivo utilizado y no tanto de una velocidad de detonación extraordinaria (recuadro 6.14).

La combinación de mejores propulsores y aceros de alta calidad aumentó el alcance de los cañones de campo y navales de menos de 2 km durante la década de 1860 a más de 30 km en 1900. La combinación de cañones de largo alcance, blindaje pesado y turbinas de vapor para la propulsión naval hizo posible la construcción de nuevos acorazados pesados, cuyo prototipo fue el HMS Dreadnought, inaugurado en 1906 (Blyth, Lambert y Ruger, 2011). El barco estaba propulsado por turbinas de vapor (introducidas por la Royal Navy en 1898), como los grandes barcos de pasajeros anteriores a la Primera Guerra Mundial —el Mauretania, el Lusitania, el Olympic y el Titanic — y los portaaviones nucleares actuales de la clase Nimitz de Estados Unidos (Smil, 2005). Otras notables innovaciones destructivas anteriores a la Primera Guerra Mundial fueron las ametralladoras, los submarinos y los primeros prototipos de aviones militares. La horrible guerra de trincheras que fue la Primera Guerra mundial se explica debido al despliegue masivo de cañones de campo pesados, ametralladoras y morteros. Ni los gases venenosos (utilizados por primera vez en 1915) ni el primer uso extensivo de aviones de combate y tanques (en 1916 y de manera masiva a partir de 1918) rompieron el dominio de la enorme potencia de fuego desplegada en los ataques frontales (Bishop, 2014).

RECUADRO 6.14

La energía cinética de los artefactos explosivos

Artefacto explosivo	Tipo de explosivo	Energía cinética (J)
Granada de mano	TNT	2×10^6
Suicida con cinturón explosivo	RDX	100×10^6
Metralla de cañón de la Segunda Guerra Mundial	TNT	600×10^6

Camión bomba (500 kg)	ANFO	2×10^9

Durante el periodo de entreguerras tuvo lugar un rápido desarrollo de tanques y aviones de caza y bombarderos. Las estructuras totalmente metálicas sustituyeron a los primitivos artefactos de madera, lona y alambre, y los primeros portaaviones llegaron en 1922 (Polmar, 2006). Estas armas sirvieron para iniciar la Segunda Guerra Mundial. Los primeros éxitos alemanes se debieron en gran medida a las rápidas penetraciones dirigidas por tanques, y el ataque sorpresa de Japón a Pearl Harbor el 7 de diciembre de 1941 no hubiera podido realizarse sin cazas de largo alcance (el Mitsubishi A6M «Zero», con un alcance de 1.867 km) y bombarderos (el Aichi 3A2, con un alcance de 1.407 km, y el Nakajima B5N2, con un alcance de 1.093 km) que despegaron desde una gran flota de portaaviones (Hoyt, 2000; National Geographic Society, 2001; Smith, 2015).

Estos mismos tipos de armas fueron esenciales para derrotar al Eje. Primero se utilizaron excelentes aviones de combate (Supermarine Spitfires y Hawker Hurricanes) y radares durante la batalla de Inglaterra en agosto y septiembre de 1940 (Collier, 1962; Hough y Richards, 2007). Luego llegaron los eficaces portaaviones estadounidenses (comenzando por la decisiva batalla de Midway en 1942) y la aplastante superioridad de los tanques soviéticos (modelo T-42) durante el empuje del Ejército Rojo hacia el oeste. La carrera armamentística de posguerra comenzó durante la misma guerra con el desarrollo del motor de reacción, el lanzamiento de misiles balísticos alemanes (el V-2 se utilizó por primera vez en 1944) y la explosión de las primeras bombas nucleares: la prueba realizada en Trinity, Nuevo México, el 11 de julio de 1945, el bombardeo de Hiroshima el 6 de agosto de 1945 y el de Nagasaki cuatro días después. La energía total liberada por estas primeras bombas nucleares fue de una magnitud superior a la de cualquier arma explosiva anterior, pero también de

una magnitud inferior a la de los posteriores diseños de bombas de hidrógeno.

El primer cañón de campo moderno, el *canon de 75 mm modèle 1897* francés, disparó proyectiles llenos de casi 700 g de ácido pícrico cuya energía explosiva alcanzó los 2,6 MJ (Benoît, 1996). Tal vez el arma más conocida de la Segunda Guerra Mundial fue el FlaK antiaéreo alemán (Flugzeugabwehrkanone) 18, una variante del cual también se utilizó en los tanques Tigre (Hogg, 1997); disparaba proyectiles de metralla cuya energía de explosión era de 4 MJ. No obstante, los explosivos más potentes de la Segunda Guerra Mundial fueron las bombas pesadas que se lanzaron sobre las ciudades. La bomba más potente que llevaba la «Fortaleza Volante» (el Boeing B-17 Flying Fortress) tenía una energía explosiva de 3,8 GJ. El mayor daño fue causado por el lanzamiento de bombas incendiarias sobre Tokio los días 9 y 10 de marzo de 1945 (recuadro 6.15, figura 6.21).

La bomba de Hiroshima liberó 63 TJ de energía, casi la mitad como explosión y un 35% como radiación térmica (Malik, 1985). Estos dos efectos provocaron un gran número de muertes instantáneas, mientras que las radiaciones ionizantes causaron víctimas tanto inmediatamente como mucho más tiempo después. La bomba explotó a las 8:15 de la mañana del 7 de agosto de 1945 a unos 580 m sobre el nivel del suelo; la temperatura en el punto de explosión fue de varios millones de grados centígrados, en comparación con los 5.000 °C de los explosivos convencionales. La bola de fuego se expandió hasta su tamaño máximo de 250 m en 1 s, la velocidad de explosión más alta en el hipocentro fue de 440 m/s, y la presión máxima alcanzada fue de 3,5 kg/cm^2 (Comité para la Compilación de Materiales, 1991). La bomba de Nagasaki liberó 92 TJ.

RECUADRO 6.15

Bombardeo de Tokio los días 9 y 10 de marzo de 1945

En esta incursión, la más grande de su tipo, participaron 334 bombarderos B-29 que descargaron bombas a baja altura (600-750 m) (Caidin, 1960; Hoyt, 2000). La mayoría eran grandes bombas de racimo de 230 kg, cada una de las cuales liberaba 39 bombas incendiarias M-69 llenas de napalm, una mezcla de poliestireno, benceno y gasolina (Mushrush *et al*., 2000). También se utilizaron bombas simples de 45 kg de gasolina gelificada y fósforo. Se lanzaron unas 1.500 t de compuestos incendiarios sobre la ciudad, y su contenido energético total (suponiendo una densidad media de napalm de 42,8 GJ/t) ascendió a 60 TJ, casi tanto como la potencia de la bomba de Hiroshima.

Sin embargo, la energía liberada por la quema de napalm solo representó una pequeña parte del total liberado por los edificios de madera incendiados en toda la ciudad. Según el Departamento de Policía Metropolitana de Tokio, la incursión estadounidense destruyó 286.358 edificios y estructuras (U.S. Strategic Bombing Survey, 1947), y las hipótesis conservadoras (250.000 edificios de madera, 4 t de madera por edificio y 18 GJ/t de madera seca) dan como resultado unos 18 PJ de energía liberada por la combustión de los edificios de madera de la ciudad, una cantidad dos órdenes de magnitud (300 veces) mayor que la energía de las bombas incendiarias. El área destruida ascendió a 4.100 ha, y al menos 100.000 personas murieron. A modo de comparación, la zona totalmente destruida de Hiroshima fue de 800 ha, y la estimación de muertes inmediatas más realista es de 66.000.

Figura 6.21 Tokio después del bombardeo de marzo de 1945 (Corbis).

Estas armas resultan ridículas comparadas con la explosión termonuclear más potente de la historia, causada por la bomba del Zar, probada por la URSS sobre Nueva Zembla el 30 de octubre de 1961 y que liberó 209 PJ de energía (Khalturin *et al*., 2005). Solo un año más tarde, Nikita Jrushchov reveló que científicos soviéticos habían construido una bomba dos veces más potente. Las comparaciones de potencia de los explosivos no suelen hacerse en julios, sino en unidades equivalentes de TNT (1 t TNT = 4.184 GJ): la bomba de Hiroshima equivalió a 15 kt TNT; la bomba del Zar a 50 Mt TNT. Las cabezas típicas de los misiles intercontinentales tienen una potencia de 100 kt-1 Mt, y el submarino estadounidense Poseidón o el ruso SS-11 pueden transportar hasta diez misiles de este tipo. Para enfatizar las magnitudes de liberación de energía de las armas

explosivas más destructivas de la humanidad, he optado por no utilizar exponentes en el recuadro 6.16).

RECUADRO 6.16

Energía máxima de las armas explosivas

Año	Arma	Energía (J)
1900	Proyectil de ácido pícrico del cañón de 75 mm modelo 1897	2.600.000
1940	Proyectil de metralla relleno de Amatol o TNT del FlaK de 88 mm alemán	4.000.000
1944	La bomba más grande transportada por el Boeing B-17	3.800.000.000
1945	Bomba de Hiroshima	63.000.000.000.000
1945	Bomba de Nagasaki	92.400.000.000.000
1961	Bomba del Zar probada en 1961	209.000.000.000.000.000

Las dos superpotencias nucleares finalmente acumularon alrededor de 5.000 ojivas nucleares estratégicas (y un arsenal de más de 15.000 cabezas nucleares más en misiles de corto alcance) con una energía destructiva agregada de alrededor de 20 EJ. Fue una escalada irracional. Como señaló Victor Weisskopf (1983: 25): «Las armas nucleares no son armas de guerra. El único propósito que pueden tener es disuasorio, y para tal propósito menos serían suficientes». Y, sin embargo, este exceso sirvió a Occidente como poderoso elemento

de disuasión, capaz de evitar una guerra termonuclear mundial obviamente imposible de ganar.

Con todo, la fabricación de bombas nucleares implicó un drenaje significativo de las arcas públicas de los países implicados, ya que requería enormes inversiones y cantidades muy grandes de energía, sobre todo para separar el isótopo fisionable de uranio (Kesaris, 1977; WNA, 2015a). La difusión gaseosa requería unos 9 GJ/SWU (unidad de trabajo separativo), mientras que las plantas de centrifugado de gas actuales solo necesitan 180 MJ/SWU, y con 227 SWU necesarias para producir 1 kg de uranio apto para armamento, esta última tasa funciona a 41 GJ/kg. Y la tríada de medios acumulados para lanzar ojivas nucleares —bombarderos de larga distancia, misiles balísticos intercontinentales y submarinos nucleares— también requería motores primarios (motores de reacción y cohetes) y estructuras cuya producción y funcionamiento consumen muchísima energía.

La fabricación de armas convencionales también consume materiales energívoros y su despliegue requiere combustibles fósiles secundarios (gasolina, queroseno, diésel) y electricidad para hacer funcionar las máquinas que las transportan y equipar y aprovisionar a los soldados que las manejan. Si bien el acero ordinario puede fabricarse a partir de mineral de hierro y arrabio con tan solo 20 MJ/kg, los aceros especiales utilizados en equipos pesados de blindaje requieren 40-50 MJ/kg. El uso de uranio empobrecido (para blindaje mejorado y proyectiles perforadores de blindaje) es aún más intensivo en energía. El aluminio y el titanio (y sus aleaciones), que son los principales materiales utilizados para construir aeronaves modernas, consumen respectivamente 170-250 MJ/kg y 450 MJ/kg, mientras que las fibras compuestas más ligeras y fuertes requieren 100-150 MJ/kg.

Obviamente, estas poderosísimas máquinas de guerra están diseñadas para un rendimiento de combate óptimo, no para un consumo de energía mínimo, y por eso son extraordinariamente intensivas en energía. El tanque M1A1 Abrams estadounidense de 60 t, por ejemplo, utiliza una turbina de gas Honeywell AGT1500 de 1,1

MW y consume (dependiendo de la misión, el terreno y el clima) 400-800 l/100 km (*Army Technology*, 2015). En comparación, un gran Mercedes S600 consume 15 l/100 km y un Honda Civic, 8 l/100 km. Y aviones de combate altamente maniobrables como el F-16 Fighting Falcon o el F/A-18 Hornet necesitan tanto combustible para volar a velocidades supersónicas (hasta 1,6-1,8 Mach) que sus misiones largas solo son posibles mediante el reabastecimiento en vuelo de la mano de grandes aviones cisterna, como el KC-10, el KC-135 y el Boeing 767.

Otra característica de la guerra moderna que requiere un gran consumo energético es el uso de cantidades masivas de armas. El ataque con tanques más importante de 1918 involucró casi 600 máquinas (en ese momento modelos relativamente livianos). En abril de 1945, el Ejército Rojo desplegó cerca de 8.000 tanques, 11.000 aviones y más de 50.000 cañones y lanzacohetes durante su asalto final a Berlín (Ziemke, 1968). Un buen ejemplo de la intensidad o la hiperactividad de la aviación moderna es la guerra del Golfo: durante las operaciones Escudo del Desierto (agosto de 1990-enero de 1991) y Tormenta del Desierto (enero-abril de 1991), 1.300 aviones realizaron más de 116.000 salidas (Gulflink, 1991).

Otro fenómeno que ha contribuido en gran medida al coste energético global de la guerra ha sido la necesidad de aumentar la producción en masa de equipo militar en periodos de tiempo muy cortos. Las dos guerras mundiales constituyen los dos mejores ejemplos. En agosto de 1914 Reino Unido solo tenía 154 aviones militares, pero cuatro años más tarde las fábricas de aviones del país empleaban a 350.000 personas y producían 30.000 aviones al año (Taylor, 1989). Cuando Estados Unidos declaró la guerra a Alemania en abril de 1917 tenía menos de 300 aviones de segunda clase, ninguno capaz de cargar ametralladoras o bombas; tres meses después, el Congreso aprobó una asignación sin precedentes de 640 millones de dólares (casi 12.000 millones de dólares en dinero de 2015) para construir 22.500 motores Liberty para nuevos cazas

(Dempsey, 2015). Y la aceleración de la industria estadounidense durante la Segunda Guerra Mundial fue aún más impresionante.

Durante el último trimestre de 1940 solo se entregaron 514 aviones a las Fuerzas Aéreas del Ejército de Estados Unidos. En 1941 el total alcanzó 8.723, en 1942, 26.448, en 1943 superó los 45.000 y en 1944 las fábricas del país produjeron 51.547 nuevos aviones (Holley, 1964). La producción aeronáutica fue el mayor sector manufacturero de la economía de guerra estadounidense: empleó a dos millones de trabajadores, requirió casi una cuarta parte de todo el gasto de guerra y produjo un total de 295.959 aviones, en comparación con 117.479 aviones británicos, 111.784 alemanes y 68.057 japoneses (Army Air Forces, 1945; Yenne, 2006). En última instancia, la victoria aliada resultó de su mayor capacidad para dominar la energía destructiva. En 1944 Estados Unidos, la URSS, Reino Unido y Canadá fabricaban tres veces más munición de combate que Alemania y Japón (Goldsmith, 1946). La creciente capacidad de destrucción de las armas y concentración de los explosivos pueden ilustrarse comparando tanto los acontecimientos discretos como los totales de víctimas del conflicto (recuadro 6.17).

RECUADRO 6.17

Las bajas de la guerra moderna

Durante la batalla del Somme (1 de julio-18 de noviembre de 1916) se contabilizaron 1,043 millones de víctimas. Las víctimas de la batalla de Stalingrado (23 de agosto de 1942-2 de febrero de 1943) superaron los 2,1 millones (Beevor, 1998). La tasa de mortalidad de las batallas —expresada en muertes por cada 1.000 hombres desplegados al comienzo de un conflicto— fue inferior a 200 durante las dos primeras guerras modernas en las que participaron las principales potencias (la guerra de Crimea de 1853-1856 y la guerra franco-prusiana de 1870-1871), pero superaron 1.500 durante la Primera Guerra Mundial y 2.000 durante la Segunda Guerra mundial (4.000 en el caso de la URSS) (Singer y Small, 1972). Alemania perdió 27.000 combatientes por millón de habitantes durante la Primera Guerra Mundial y

más de 44.000 durante la Segunda Guerra Mundial. Las bajas civiles de la guerra crecieron aún más rápido. Durante la Segunda Guerra Mundial fueron 40 millones, más del 70% del total de 55 millones de fallecidos.

El bombardeo de las grandes ciudades produjo enormes pérdidas en días u horas (Kloss, 1963; Levine, 1992). El total de bajas de los bombardeos alemanes alcanzó 600.000 muertos y 900.000 heridos. Unas 100.000 personas murieron durante los ataques nocturnos de los bombarderos B-29, que arrasaron con 83 km^2 de las cuatro ciudades principales de Japón entre el 10 y el 20 de marzo de 1945. Ya se han descrito los efectos del bombardeo de Tokio y el ataque nuclear a Hiroshima (véase recuadro 6.15).

El cálculo del coste energético de los principales conflictos armados requiere importantes delimitaciones arbitrarias de lo que debe incluirse y lo que no. Después de todo, las sociedades en peligro de muerte no diferencian entre sector civil y militar, ya que el esfuerzo económico en tiempos de guerra afecta a casi todas las actividades. Las sumas disponibles sitúan el coste global de los principales conflictos del siglo XX para Estados Unidos en 334.000 millones de dólares para la Primera Guerra Mundial, 4,1 billones de dólares para la Segunda Guerra Mundial y 748.000 millones de dólares para la guerra de Vietnam (1964-1972), todos ellos expresados en dólares de 2011 (Daggett, 2010). Calcular estos costes en dinero actual y multiplicarlos por la media ajustada de la intensidad energética del PIB del país equivaldría a hacer una aproximación razonable del coste energético mínimo de dichos conflictos.

Igualmente, es necesario hacer ajustes, porque la producción industrial y el transporte en tiempos de guerra consumieron más energía por unidad producida que la unidad media del PIB. Como aproximaciones, he elegido los múltiplos 1,5, 2 y 3 para los conflictos mencionados anteriormente. Como resultado, la participación en la Primera Guerra Mundial habría representado el 15% del consumo energético total de Estados Unidos en 1917 y 1918 y el 40% durante la Segunda Guerra Mundial, pero no más del 4% mientras duró la guerra de Vietnam. Obviamente, los picos de consumo fueron más

altos: desde un 54% para Estados Unidos en 1944 hasta un 76% para la URSS en 1942 (y un porcentaje similar para Alemania en 1943).

No existe una correlación obvia entre consumo energético y éxito a la hora de llevar a cabo actos modernos de ataque (o defensa). El caso más claro de una correlación positiva entre consumo energético y una victoria relativamente fácil es la participación de Estados Unidos en la Segunda Guerra Mundial, impulsada por un aumento del 46% en el consumo total de energía primaria entre 1939 y 1944. No obstante, aunque convencionalmente hablando Estados Unidos fue aún más dominante durante la guerra de Vietnam —lanzó tres veces más explosivos sobre Vietnam que durante la Segunda Guerra Mundial sobre Alemania y Japón, y por aquel entonces tenía cazas de reacción, bombarderos, helicópteros, portaaviones y defoliantes de última generación—, por diversas razones políticas y estratégicas ese dominio no se tradujo en una victoria.

Por supuesto, los ataques terroristas son el mejor ejemplo de ausencia de cualquier correlación clara entre consumo de energía y resultado obtenido. Invirtiendo por completo el paradigma de la Guerra Fría, en el que las armas eran extremadamente caras de producir y cuidadosamente custodiadas por los Estados, los terroristas usan armas baratas y ampliamente disponibles. Cientos de kilogramos de ANFO (nitrato de amonio y fueloil) para un camión bomba, decenas de kilogramos en el caso de un coche bomba o incluso solo unos kilogramos de explosivos de alta potencia (a menudo con puntas metálicas) fijados a los cuerpos de los terroristas suicidas bastan para causar decenas o cientos de muertes (en 1983, dos camiones bomba mataron a 307 personas, mayoritariamente militares estadounidenses, en sus cuarteles en Beirut) y muchas más lesiones, además de aterrorizar a la población objetivo.

Los 19 secuestradores del 11 de septiembre no tenían más armas que unos cuantos *cutters*, y toda la operación, incluidas las lecciones de vuelo, costó menos de 500.000 dólares (Bin Laden, 2004: 3). En contraste, incluso la estimación más conservadora del coste monetario

que supusieron los atentados (el informe del interventor de la ciudad de Nueva York, publicado en 2002) cifraba el coste directo para la ciudad en 95.000 millones de dólares, incluidos 22.000 millones para reemplazar los edificios y la infraestructura y 17.000 millones en concepto de salarios perdidos (Thompson, 2002). Un análisis nacional que evalúa la contracción del PIB, la disminución del valor de las acciones, las pérdidas de la industria aérea y turística, el aumento de las tasas de seguro y envío, y el incremento del gasto en seguridad y defensa sitúa el coste en más de 500.000 millones de dólares (Looney, 2002). Si añadimos parte del coste de la posterior invasión y ocupación de Irak, el total superaría con creces el billón de dólares. Y, como demuestra la experiencia adquirida desde el ataque en cuestión, no existe una solución militar sencilla, ya que tanto las armas clásicas de gran potencia como las máquinas inteligentes más recientes tienen una utilidad limitada contra personas o grupos fanáticos dispuestos a morir en ataques suicidas.

No hay duda de que el concepto de destrucción mutua asegurada (también conocida como «1+1=0») ha sido la razón principal por la que las dos superpotencias nucleares no han librado una guerra termonuclear. Al mismo tiempo, la magnitud de los arsenales nucleares acumulados por ambos y, por tanto, su coste energético han superado con creces cualquier nivel de disuasión racionalmente defendible. Cada paso en el desarrollo, despliegue, salvaguarda y mantenimiento de ojivas nucleares y sus portadores (bombarderos intercontinentales, misiles balísticos y submarinos de propulsión nuclear) es intensivo en energía. Una estimación de orden de magnitud es que las armas nucleares y sus vectores representaron al menos el 5% de toda la energía comercial estadounidense y soviética consumida entre 1950 y 1990 (Smil, 2004).

Pero incluso si el consumo energético fuera el doble, podría argumentarse que resulta aceptable en comparación con el coste que habría tenido un intercambio termonuclear que, incluso si hubiera sido muy limitado, habría dado lugar a decenas de millones de

víctimas por los efectos directos de la explosión, el fuego y la radiación ionizante (Solomon y Marston, 1986). Un intercambio termonuclear entre Estados Unidos y la URSS limitado a las instalaciones estratégicas habría causado 27-59 millones de muertes a finales de la década de 1980 (Von Hippel *et al*., 1988). Tal perspectiva ha actuado como un poderoso disuasivo para lanzar (y después de la década de 1960 incluso contemplar seriamente) el primer ataque.

Lamentablemente, el coste atribuible a las armas nucleares no cesaría ni siquiera si se prohibieran ahora mismo: su desarme y costosa salvaguardia, así como la limpieza de los lugares de producción contaminados, durarían décadas, y el coste estimado de estas operaciones en Estados Unidos no ha hecho más que aumentar en los últimos años. Limpiar las instalaciones de armas nucleares más gravemente contaminadas en los países de la antigua URSS sería aún más costoso. Afortunadamente, el coste de desmantelamiento de las ojivas puede reducirse mucho si el material fisionable recuperado se reutiliza para la generación de electricidad (WNA, 2014).

El uranio altamente enriquecido (UAE, que contiene 20-90% de U-235) se mezcla con uranio empobrecido (principalmente U-238), natural (0,7% de U-235) o parcialmente enriquecido para producir el uranio poco enriquecido (<5% de U-235) que se utiliza en las centrales. Según un acuerdo de 1993 entre Estados Unidos y Rusia («Megatones por megavatios»), Rusia convirtió 500 t de UAE de sus ojivas y reservas estratégicas (equivalentes a 20.000 bombas nucleares) en combustible poco enriquecido (con un promedio de U-235 de 4,4%) y lo vendió para alimentar reactores civiles de Estados Unidos.

No puedo cerrar esta sección sobre guerra y energía sin hablar sobre la energía como *casus belli*. Se trata de una creencia muy extendida. Su último epifenómeno sería la invasión de Irak en 2003, realizada, según dicen algunos, para controlar el petróleo iraquí. Y entre los historiadores, el ejemplo más recurrente es el ataque japonés a Estados Unidos en diciembre de 1941. El gobierno de Roosevelt primero derogó el Tratado de Comercio y Navegación de 1911 (en

enero de 1940), luego dejó de otorgar licencias para la exportación de gasolina de aviación y herramientas mecánicas (en julio de 1940), y a continuación prohibió la exportación de chatarra de hierro y acero (en septiembre de 1940). Eso, según dicen todavía hoy muchos historiadores japoneses, condujo al país a no tener más remedio que atacar a Estados Unidos para tener vía libre para asaltar el sudeste asiático con sus campos de petróleo de Sumatra y Birmania.

Sin embargo, Pearl Harbor vino precedido por casi una década de militarismo japonés expansivo, comenzando con la conquista de Manchuria en 1933 y siguiendo con el ataque a China en 1937. Japón podría haber tenido acceso continuo al petróleo de Estados Unidos si hubiera abandonado su agresiva política hacia China (Ienaga, 1978). No es sorprendente que Marius Jansen, uno de los historiadores más prestigiosos sobre el Japón moderno, escribiera sobre la naturaleza peculiarmente autoinfligida de toda la confrontación con Estados Unidos (Jansen, 2000). ¿Y quién se atrevería a afirmar que la agresión en serie de Hitler —contra Checoslovaquia (en 1938 y 1939), Polonia (1939), Europa occidental (a partir de 1939) y la URSS (1941)— y su guerra genocida contra los judíos estuvieron motivadas por el acceso a los recursos energéticos?

Tampoco había motivos relacionados con la energía para la guerra de Corea (iniciada por orden de Stalin), el conflicto en Vietnam (los franceses luchando contra las guerrillas comunistas hasta 1954, Estados Unidos entre 1964 y 1972), la ocupación soviética de Afganistán (1979-1989), la guerra estadounidense contra los talibanes (iniciada en octubre de 2001) o los conflictos transfronterizos de finales del siglo XX (China-India, India-Pakistán en diversas ocasiones, Eritrea-Etiopía y muchos más) y las guerras civiles (Angola, Uganda, Sri Lanka, Colombia). Y, aunque la guerra de Biafra en Nigeria (1967-1970) y la interminable guerra civil de Sudán (ahora transformada en conflicto entre Sudán y Sudán del Sur y guerra tribal dentro de Sudán del Sur) tenían mucho que ver con el petróleo, en realidad ambas derivaban de enemistades religiosas y étnicas (el conflicto sudanés

comenzó en 1956, décadas antes de que se descubriera petróleo en la región).

Finalmente, hay dos guerras en las que el petróleo suele considerarse la causa real del conflicto. La invasión iraquí de Kuwait en agosto de 1990 duplicó las reservas de crudo convencional bajo control de Sadam Husein y amenazó los gigantescos campos petrolíferos saudíes cercanos (Safaniya, Zuluf, Marjan y Manifa, *onshore* y *offshore*, justo al sur de Kuwait), así como la supervivencia de la monarquía. Sin embargo, había más en juego que el petróleo, incluida la búsqueda iraquí de armas nucleares y otras armas no convencionales (en 1990 nadie lo dudaba) y los riesgos de otra guerra árabe-israelí (los ataques iraquíes con misiles contra Israel perseguían provocar ese conflicto). Y si el control de los recursos petrolíferos era el objetivo principal de la guerra del Golfo de 1991, ¿por qué se ordenó al ejército victorioso que detuviera su progreso imparable hasta como mínimo controlar los campos más ricos del sur de Irak? ¿Cuáles han sido los resultados de la invasión estadounidense de Irak en 2003? Las importaciones estadounidenses de petróleo iraquí alcanzaron su punto álgido en 2001, cuando Sadam Husein todavía estaba al mando, con 41 Mt; después de la invasión disminuyeron de manera continua; en 2015 no llegaron ni a 12 Mt, menos del 3 % de todas las importaciones del país (USEIA, 2016b), cantidad que desde entonces se ha reducido todavía más a medida que la fracturación hidráulica ha convertido a Estados Unidos en el mayor productor mundial de petróleo y líquidos de gas natural (BP, 2016). El veredicto es simple: Estados Unidos no necesita el petróleo iraquí; el este asiático ha sido su mayor comprador. En ese caso, ¿Estados Unidos invadió Irak para asegurar el suministro de petróleo chino? Incluso el caso que muchos toman como una clara demostración de guerra causada por la energía es todo lo contrario. La conclusión es clara: no ha sido la búsqueda de recursos, sino la persecución de objetivos estratégicos más amplios (justificados o fuera de lugar), lo que ha

conducido a Estados Unidos a sus conflictos posteriores a la Segunda Guerra Mundial.

Cambios medioambientales

La provisión y el uso de combustibles fósiles y electricidad son las principales causas de la contaminación antropogénica de la atmósfera y la emisión de gases de efecto invernadero. También son los principales responsables de la contaminación del agua y el cambio en el uso de la tierra. La combustión de todos los combustibles fósiles conlleva, por supuesto, una rápida oxidación de su carbono, lo que produce un aumento de las emisiones de CO_2, mientras que el metano (CH4), un gas de efecto invernadero más potente, se libera durante la producción y el transporte de gas natural; durante la combustión de los combustibles fósiles también se liberan pequeños volúmenes de óxido nitroso (N_2O). Durante mucho tiempo la combustión del carbón fue una gran fuente de emisión de partículas y óxidos de azufre y nitrógeno (SOx y NOx), pero hoy en día las emisiones estacionarias de estos gases están controladas en buena medida gracias a los precipitadores electrostáticos y los procesos de desulfuración y eliminación de NOx (Smil, 2008a). Aun así, las emisiones por combustión del carbón siguen teniendo importantes repercusiones en la salud (Lockwood, 2012).

La contaminación del agua se debe principalmente a los vertidos accidentales de petróleo (de oleoductos, vagones de ferrocarril, barcazas y tanqueros y refinerías) y el drenaje ácido de minas. Los principales cambios en el uso de la tierra se deben a la minería de carbón de superficie, los embalses creados por las principales presas hidroeléctricas, los corredores de líneas de alta tensión, la construcción de grandes instalaciones de almacenamiento, refinado y distribución de combustibles líquidos, y, recientemente, la construcción de grandes parques eólicos y solares. Indirectamente, los combustibles y la electricidad son responsables de muchos más flujos de contaminación y efectos de degradación de los ecosistemas. Los

más notables se derivan de la producción industrial (sobre todo la siderurgia y la síntesis química), los productos químicos agrícolas, la urbanización y el transporte. Estos impactos han ido aumentando tanto en extensión como en intensidad y hoy afectan al medio ambiente tanto a nivel local como regional. Su coste ha obligado a las principales economías del mundo a prestar cada vez más atención a la gestión ambiental.

En la década de 1960 uno de estos problemas, la lluvia ácida en Europa central y occidental y el este de América del Norte, causada principalmente por las emisiones de SOx y NOx de las grandes centrales eléctricas de carbón (pero también por las emisiones de los automóviles), alcanzó una escala semicontinental. Hasta mediados de la década de 1980 solía considerarse como el problema ambiental más apremiante al que se enfrentaban los países prósperos (Smil, 1985, 1997). Una combinación de medidas —el cambio a carbón con bajo contenido de azufre y gas natural sin azufre en la generación de electricidad, el uso de gasolina y diésel más limpios y motores de automóviles más eficientes, y la instalación de sistemas de desulfuración de los gases de combustión de las principales fuentes de contaminación— no solo detuvo el proceso de acidificación, sino que en 1990 se redujo, de tal manera que la lluvia en Europa y América del Norte se volvió menos ácida (Smil, 1997). Sin embargo, desde 1990 se ha vuelto a producir el mismo problema en Asia oriental tras el gran aumento del consumo de carbón en China a partir de 1980.

La destrucción parcial de la capa de ozono sobre la Antártida y el océano que la circunda asumió brevemente el primer lugar entre los problemas medioambientales asociados con el consumo de energía. En 1974 se previó con precisión la posibilidad de que se redujera la concentración del ozono estratosférico que protege al planeta de una excesiva radiación ultravioleta, y en efecto este fenómeno tuvo lugar por primera vez sobre la Antártida en 1985 (Rowland, 1989). La pérdida de ozono ha sido causada en buena medida por las emisiones de gases clorofluorocarbonos (CFC, utilizados principalmente como

refrigerantes), pero un tratado internacional particularmente eficaz, el Protocolo de Montreal, firmado en 1987, combinado con el uso de compuestos menos nocivos, pronto resolvió el problema (Andersen y Sarma, 2002).

La amenaza al ozono estratosférico fue solo la primera de varias nuevas preocupaciones sobre las consecuencias globales de los cambios ambientales en curso (Turner *et al*., 1990; Mc-Neill, 2001; Freedman, 2014). Las preocupaciones recientes más importantes han ido desde la pérdida de biodiversidad mundial hasta la acumulación de plásticos en los océanos, pero desde finales de la década de 1980 la preocupación global primordial ha sido y sigue siendo la emisión antropogénica de gases de efecto invernadero que causan un cambio climático relativamente rápido, sobre todo el calentamiento de la troposfera, la acidificación de los océanos y el aumento del nivel del mar. El comportamiento de los gases de efecto invernadero y su probable efecto de calentamiento se entendieron con relativa claridad a finales del siglo XIX (Smil, 1997). El principal contribuyente antropogénico es el CO_2, producto final de la combustión de cualquier combustible fósil o de biomasa, mientras que la destrucción de los bosques (sobre todo en los trópicos húmedos) y pastizales ha sido la segunda fuente más importante de emisiones de CO_2 (IPCC, 2015).

La generación antropogénica mundial de CO_2, que en 1850 era de solo 54 Mt C (hay que multiplicar por 3.667 para convertirlo en CO_2), ha ido aumentando exponencialmente con el creciente consumo de combustibles fósiles: como ya se ha señalado, en 1900 alcanzó 534 Mt C y en 2010 superó las 9 Gt C (Boden y Andrés, 2015). En 1957 Hans Suess y Roger Revelle concluyeron que:

> la humanidad está llevando a cabo un tipo de experimento geofísico a gran escala que no podría haber ocurrido en el pasado ni podrá reproducirse en el futuro. En pocos siglos estamos devolviendo a la atmósfera y los océanos el carbono orgánico

concentrado almacenado en las rocas sedimentarias a lo largo de cientos de millones de años. (Revelle y Suess, 1957: 19)

La primera medición sistemática del creciente nivel de CO_2 atmosférico, realizada por Charles Keeling (1928-2005), comenzó en 1958 cerca de la cumbre del volcán Mauna Loa, en Hawái, y en el Polo Sur (Keeling, 1998). La concentración de Mauna Loa ha sido utilizada como marcador global del aumento del CO_2 troposférico: en 1959 promediaba 316 ppm, en 1988 superaba 350 ppm y en 2014 era de 398,55 ppm (NOAA, 2015; figura 6.22). Otros gases de efecto invernadero son emitidos por la actividad humana en volúmenes mucho menores que el CO_2, pero, como relativamente sus moléculas absorben más radiación infrarroja saliente (86 veces más a lo largo de 20 años en el caso del metano y 268 veces más en el caso de los óxidos nitrosos), su contribución combinada ya representa el 35% de la radiación de origen antropogénico (recuadro 6.18).

La posición de consenso es que, para evitar las peores consecuencias del calentamiento global, el aumento medio de la temperatura debería limitarse a menos de 2 °C. Pero ello exigiría una reducción inmediata y sustancial de la quema de combustibles fósiles y una rápida transición a fuentes de energía que no emitan carbono, lo que no es imposible, pero sí muy improbable dado el predominio de los combustibles fósiles en el sistema energético mundial, así como la enorme necesidad de energía de las sociedades más pobres. Parte de esta necesidad puede satisfacerse mediante la generación de electricidad renovable, pero no existe ninguna alternativa asequible y de gran escala disponible para el transporte, determinadas materias primas (amoníaco, plástico) o la fundición de hierro.

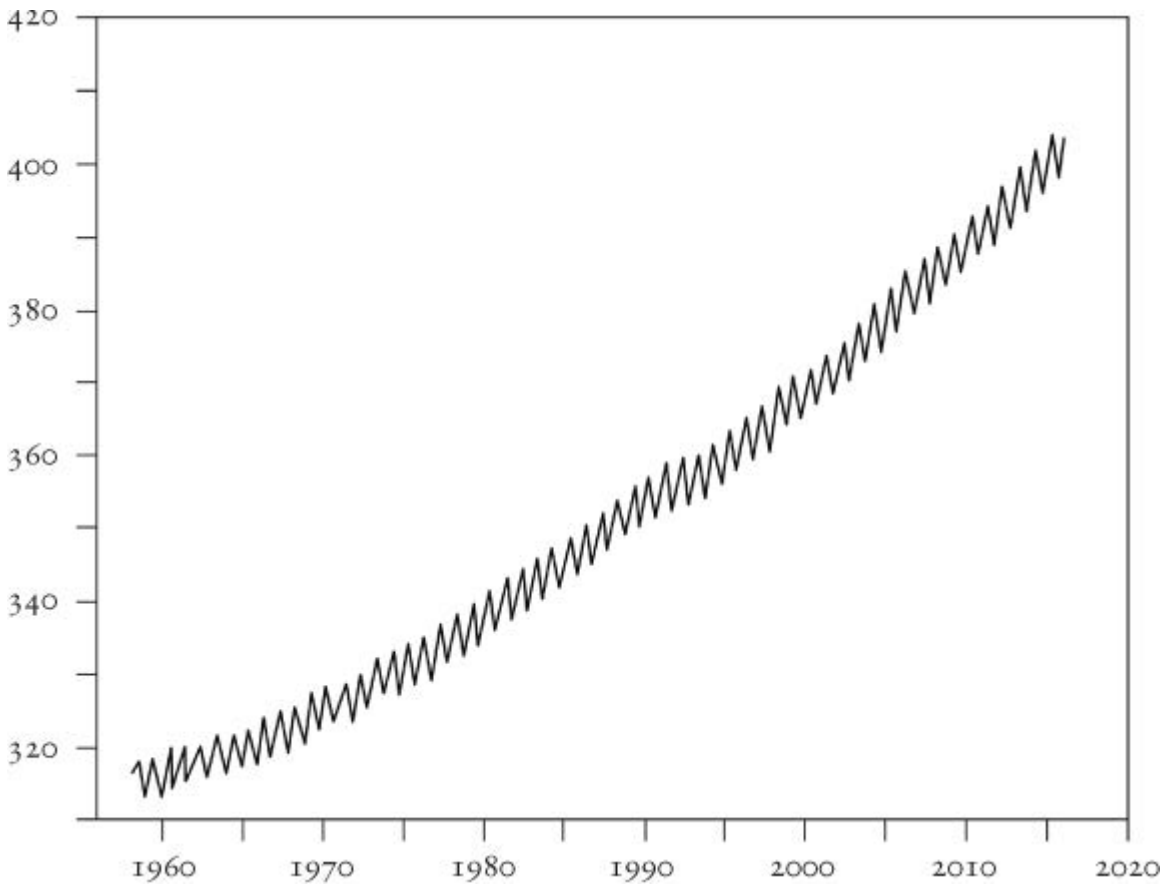


Figura 6.22 CO_2 atmosférico medido en el Observatorio de Mauna Loa, en Hawái (NOAA, 2015).

RECUADRO 6.18

Los gases de efecto invernadero y el aumento de la temperatura troposférica

En 2014 la tasa global de forzamiento radiativo antropogénico (capacidad de los gases de efecto invernadero para afectar al balance energético del planeta) alcanzó los 2.936 W/m^2, con una contribución del CO_2 del 65% (Butler y Montzka, 2015). En cuanto a las causas, los combustibles fósiles representan más del 60%, el cambio en el uso de la tierra (principalmente la deforestación) un 10% y las emisiones de metano (principalmente procedentes de la ganadería) un 20%. El aumento de la temperatura superficial media a nivel global (combinando datos oceánicos y terrestres) muestra un aumento lineal de 0,85 °C (0,65-1,06 °C) entre 1880 y 2012 (IPCC, 2015). La incertidumbre relativa a los futuros niveles de emisiones mundiales y la complejidad de los

procesos atmosféricos, hidrosféricos y biosféricos y las interacciones que rigen el ciclo mundial del carbono hacen imposible la construcción de modelos fiables que prevean la temperatura y el aumento del nivel del mar para 2100. La última evaluación de consenso estima que (en buena medida en función de las futuras tasas de emisiones) a finales del siglo XXI (2081-2100) la temperatura media del planeta será al menos 0,3-1,7 °C más alta que durante 1986-2005, pudiendo alcanzar hasta 2,6-4,8 °C (IPCC, 2015).

En cualquier caso, la región del Ártico continuará calentándose más rápidamente. Obviamente, tasas más bajas facilitarían la adaptación, mientras que un incremento más rápido plantearía problemas muy graves. La multitud de cambios atribuibles al calentamiento global van desde nuevos patrones de precipitación, inundaciones costeras y cambios en los límites de los ecosistemas hasta la propagación de enfermedades transmitidas por vectores de clima cálido. Los cambios en la productividad de las plantas, la pérdida de bienes inmuebles costeros, el desempleo sectorial y las migraciones climáticas a gran escala desde regiones particularmente afectadas serían las principales consecuencias económicas. No existe una solución técnica fácil (como la captura de CO_2 del aire o el almacenamiento de CO_2 bajo tierra, que para ser efectivos deberían poder manejar más de 10 Gt de CO_2/año a un coste asequible) para las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero. El único enfoque potencialmente exitoso para hacer frente a estos cambios es una cooperación internacional sin precedentes. Sin querer, este preocupante desafío también ofrece una excelente excusa y fuente de motivación para gestionar los asuntos humanos de otra manera.

7

LA ENERGÍA EN LA HISTORIA DEL MUNDO

Todos los procesos naturales y todas las acciones humanas son —en un sentido físico fundamental— transformaciones de energía. Los avances de la civilización pueden pensarse como la búsqueda de un mayor consumo de energía para obtener mejores cosechas, disponer de más y mejores materiales, producir más bienes y más diversos, permitir una mayor movilidad o acceder a una cantidad virtualmente ilimitada de información. Estos avances han dado lugar a poblaciones más grandes, con mayor calidad de vida y socialmente organizadas de manera compleja en Estados-nación y colectivos supranacionales. Subrayar los principales hitos de esta historia en términos de fuentes de energía y motores primarios dominantes es —como espero que este libro demuestre— bastante sencillo. De igual modo, tampoco es difícil analizar las consecuencias socioeconómicas más importantes de estos cambios técnicos.

Lo que resulta mucho más complicado es hallar un equilibrio sensato entre pensar la historia desde el prisma de los imperativos energéticos y, alternativamente, la multitud de factores no energéticos que siempre han causado, controlado y transformado el uso de la energía por parte de los seres humanos. Aún más importante resulta señalar la paradoja básica del papel de la energía en la evolución de la

vida en general y en la historia humana en particular. Todos los sistemas vivos se sostienen mediante incesantes importaciones de energía. Esta dependencia genera necesariamente limitaciones importantes. Pero estos flujos de energía que sostienen la vida no pueden explicar ni la existencia misma de los organismos ni las complejidades de su organización.

GRANDES PATRONES DE CONSUMO ENERGÉTICO

La mejor forma de caracterizar la relación a largo plazo entre progreso humano y fuentes de energía y motores primarios dominantes es describir eras energéticas y transiciones. Este enfoque debe evitar la periodización rígida (pues algunas transiciones se desarrollan muy lentamente) y reconocer que las generalizaciones relativas a periodos específicos pueden esconder importantes diferencias en el inicio y el ritmo de los principales procesos subyacentes. Tal vez el mejor ejemplo reciente sea el desarrollo excepcionalmente rápido de China a partir de 1990, que en una generación ha logrado lo que muchos países consiguieron en tres generaciones durante las primeras etapas de la industrialización. También existen muchas particularidades nacionales y regionales que impulsan y dan forma a estos complejos procesos de cambio.

Las uniformidades más obvias dictadas por eras energéticas específicas tienen que ver con actividades relacionadas con la extracción, conversión y distribución de energía. Los músculos humanos y los bueyes uncidos ponen límites muy parecidos a la extensión de tierra que puede ser plantada o cosechada en un día, tanto en el Punyab como en Picardía; el rendimiento de las carboneras tradicionales de Tohoku (norte de Honshu) difiere poco del de las de Yorkshire (norte de Inglaterra). En la civilización global moderna estos elementos comunes se han convertido en identidades casi perfectas: las mismas fuentes de energía y los mismos motores primarios se gestionan, extraen y convierten ahora en todo el mundo con los

mismos procesos y máquinas, y la mayoría de ellos son a menudo producidos o desplegados por un reducido número de grandes empresas multinacionales.

Algunas de estas empresas globales son Schlumberger, Halliburton, Saipem, Transocean y Baker para los servicios de los yacimientos petrolíferos; Caterpillar, Komatsu, Volvo, Hitachi y Liebherr para la maquinaria pesada de construcción; General Electric, Siemens, Alstom, Weir Allen y Elliott para las grandes turbinas de vapor; y Boeing y Airbus para los grandes aviones de pasajeros. A medida que el alcance de los servicios y productos de estas empresas se ha hecho verdaderamente mundial, las antiguas diferencias internacionales en cuanto a rendimiento y fiabilidad han ido reduciéndose enormemente o incluso desapareciendo por completo. En algunos casos, los que empiezan tarde disponen ahora de un mayor número de técnicas avanzadas que los pioneros industriales. Y, a pesar de las grandes diferencias en los entornos culturales y políticos, también existe un margen sorprendentemente amplio para establecer generalidades respecto de las consecuencias socioeconómicas de estos grandes cambios energéticos.

Dado que la mejor explotación posible de las mismas fuentes de energía y los mismos motores primarios requiere las mismas técnicas, esta uniformidad impone también muchas marcas idénticas (o muy similares) no solo en los cultivos (lo que conduce al predominio de unos pocos cultivos comerciales y la producción masiva de alimentos para animales), sino también en las actividades industriales (que implican especialización, concentración y automatización), la organización de las ciudades (dando lugar a la aparición de distritos comerciales en el centro de las ciudades, la suburbanización y, posteriormente, la búsqueda de espacios verdes) y las disposiciones en materia de transporte (que en las grandes ciudades se manifiesta en la necesidad de contar con metros, trenes de cercanías, desplazamientos en coche y flotas de taxis), así como en las pautas de consumo, las actividades de ocio y las aspiraciones intangibles.

En todas las sociedades de alto consumo energético y en las zonas urbanas de muchas economías de crecimiento relativamente rápido, más del 90% de los hogares poseen televisores, refrigeradores y lavadoras. Otros artículos de propiedad habitual van desde los dispositivos electrónicos personales hasta las unidades de aire acondicionado y los vehículos privados. Entre las tendencias de consumo de alimentos compartidas a nivel mundial figuran la internacionalización de los gustos (el *tikka masala* es el alimento más popular de Inglaterra y el *kare raisu*, que es lo mismo, el más popular en Japón), la popularización de la comida rápida y la disponibilidad de frutas y hortalizas de temporada a lo largo de todo el año, una comodidad que implica un coste energético importante de envíos intercontinentales en contenedores refrigerados y entregas por vía aérea. Entre las actividades de ocio hoy universales se encuentran los vuelos a playas cálidas, las visitas a parques temáticos (el Disneyland estadounidense existe ahora también en Francia, China, Hong Kong y Japón) y los cruceros (que antes eran un entretenimiento europeo y americano y ahora experimentan su mayor crecimiento en Asia). Y llevando el análisis un paso más allá, los fundamentos energéticos compartidos también afectan de manera parecida a muchas aspiraciones intangibles, especialmente la educación superior (y de élite).

Con todo, lo que se repite una y otra vez es la enorme brecha entre sociedades pobres (cuyos cimientos energéticos son una amalgama de combustibles de biomasa tradicionales y motores primarios animados y proporciones crecientes de combustibles fósiles y electricidad) y países energívoros (industrializados o posindustriales) cuyo consumo de combustibles fósiles y electricidad per cápita ha alcanzado (o se ha aproximado a) niveles de saturación. Esta brecha puede observarse en todos los ámbitos: el rendimiento económico global, el nivel de vida medio, la productividad laboral o el acceso a la educación. Y cada vez está menos relacionada con disparidades internacionales y más con una división basada en privilegios, realidad que las clases acomodadas

de China y la India reflejan de manera especialmente clara. En 2013 una filial del Club de Automóviles Deportivos de China exigió a sus miembros que tuvieran un coche mejor que el Porsche Carrera GT de 440.000 dólares (Taylor, 2013), mientras que el edificio residencial privado más caro de Asia, el rascacielos de 27 pisos y 2.000 millones de dólares de Mukesh Ambani en el centro de Bombay, tiene una vista sin obstáculos sobre las extensas barriadas de la ciudad.

Eras energéticas y transiciones

Cualquier periodización realista del consumo energético humano debe tener en cuenta tanto los combustibles como los motores primarios dominantes. Esto impide las dos divisiones posibles (y conceptualmente atractivas) de la historia en solo dos eras energéticas distintas. El contraste entre lo animado y lo inanimado diferencia las sociedades tradicionales, en las que los músculos humanos y animales eran los principales motores primarios, de la civilización moderna, que depende de máquinas alimentadas con combustibles y electricidad. Pero esta división engaña tanto sobre el pasado como sobre el presente. En algunas antiguas altas culturas dos clases de motores primarios inanimados —las ruedas hidráulicas y los molinos de viento — tuvieron una importancia crítica siglos antes del advenimiento de las máquinas modernas.

Y el auge de Occidente se debe en buena medida a una poderosa combinación de dos motores primarios inanimados: el aprovechamiento eficaz del viento y el uso de la pólvora, encarnados por los veleros transoceánicos equipados con cañones pesados (McNeill, 1989). Además, la división clara entre motores primarios animados e inanimados solo se ha dado plenamente entre la quinta parte más rica de la humanidad. En las regiones rurales más pobres de África y Asia sigue dependiéndose de manera sustancial del trabajo pesado de personas y animales, y cientos de millones de trabajadores de muchas industrias extractivas, de transformación y manufactureras de países de bajos ingresos realizan diariamente tareas manuales

exhaustivas (y a menudo arriesgadas) que van desde triturar piedras para fabricar grava hasta desmantelar viejos petroleros.

La segunda simplificación, el uso de fuentes de energía renovables frente a las no renovables, se basa en la dicotomía básica entre milenios dominados por motores primarios animados y combustibles de biomasa tradicionales y el pasado reciente, muy dependiente de los combustibles fósiles y la electricidad. Una vez más, la realidad es más compleja. El suministro de biomasa en las sociedades de la era de la madera no era siempre renovable: la tala excesiva de árboles, seguida de una erosión destructiva del suelo en tierras vulnerables (por ejemplo, laderas), imposibilitó el crecimiento sostenible de los bosques en vastas regiones del Viejo Mundo, especialmente alrededor del Mediterráneo y el norte de China. Y en el mundo actual, dominado por los combustibles fósiles, la energía hidráulica, un recurso renovable, genera aproximadamente una sexta parte de toda la electricidad, mientras que, como ya he señalado, la mayoría de los agricultores de los países pobres siguen dependiendo de la mano de obra humana y animal para el trabajo de campo y el mantenimiento de los sistemas de riego.

Las divisiones claras en eras energéticas específicas no solo no son realistas por la existencia de grandes diferencias nacionales y regionales a la hora de inventar y adoptar de manera generalizada nuevos combustibles y motores primarios, sino también por el carácter evolutivo de las transiciones energéticas (Melosi, 1982; Smil, 2010a). Las fuentes de energía y los motores primarios dominantes en un momento dado pueden ser sorprendentemente persistentes, de tal manera que los nuevos suministros o las nuevas técnicas pueden llegar a ser dominantes después de largos periodos de difusión gradual. Una combinación de funcionalidad, accesibilidad y coste explica la mayor parte de esta inercia. Mientras las fuentes de energía y los motores primarios establecidos funcionen bien dentro de un determinado entorno, estén fácilmente disponibles y sean rentables, sus sustitutos, incluso si presentan beneficios claramente superiores, se impondrán

despacio. Un economista puede considerar este fenómeno como un caso de dependencia del camino o rigidez institucional, de acuerdo con el concepto de David (1985), quien basó su argumento en la crítica al diseño de teclado QWERTY (en oposición al diseño de teclado DVORAK, supuestamente más eficiente).

Pero no necesitamos cuestionables nuevas etiquetas para describir lo que en realidad es un proceso muy habitual de progresión notable lenta y evolutiva, relacionada tanto con la evolución del organismo y la toma de decisiones personales como con los avances técnicos y la gestión económica. Abundan ejemplos en la historia de la energía. Los molinos de agua romanos se usaron por primera vez en el siglo I a. C., pero se hicieron comunes 500 años más tarde. Incluso entonces, en la práctica su uso se limitaba a la molienda de granos. Como señaló Finley (1965), la liberación de los esclavos y los animales de su trabajo pesado no era un incentivo suficientemente potente para el desarrollo rápido de los molinos de agua. A finales del siglo XVI la circunnavegación de la Tierra por medio de veleros se había vuelto algo habitual, pero en 1571, en la batalla de Lepanto, cada bando utilizó más de 200 galeras; en 1588 la Armada Invencible, dispuesta a invadir Inglaterra, todavía utilizaba cuatro galeras grandes y cuatro galeazas tripuladas por más de 2.000 remeros convictos, y las galeras suecas, dotadas de abundante artillería, se utilizaron para destruir gran parte de la flota rusa en 1790, en la segunda batalla de Svensksund (Martin y Parker, 1988; Parker, 1996).

Los animales de tiro, la energía hidráulica y las máquinas de vapor coexistieron en la Europa industrializada y en América del Norte durante más de un siglo. En Estados Unidos, país rico en madera, el carbón superó a la combustión de leña —y el coque pasó a ser más importante que el carbón— durante la década de 1880 (Smil, 2010a). La potencia mecánica en la agricultura superó la potencia de los caballos y las mulas solo a finales de la década de 1920; a principios de la década de 1950 todavía había millones de mulas en el sur de Estados Unidos, y el Departamento de Agricultura de Estados Unidos

dejó de contar los animales de tiro en 1963. Y durante la Segunda Guerra Mundial los buques de la clase Liberty (EC2), los cargueros dominantes de la flota estadounidense, no utilizaban nuevos y eficientes motores diésel, sino motores de vapor de tres cilindros alimentados por calderas de petróleo (Elphick, 2001).

A la hora de establecer pautas de largo plazo para el despliegue de motores primarios en las sociedades del Viejo Mundo, solo cabe sugerir aproximaciones sugerentes. Su característica más notable es la dominación del trabajo humano (figura 7.1). Los músculos humanos fueron la única fuente de energía mecánica desde el comienzo de la evolución de los homínidos hasta la domesticación de los animales de tiro, que comenzó hace solo 10.000 años. La potencia humana aumentó con el uso cada vez más frecuente de nuevas y mejores herramientas, mientras que el trabajo de los animales siguió estando limitado durante milenios en todo el mundo por un uncido deficiente y una alimentación inadaptada (en América y Oceanía ni siquiera había animales de tiro). Los músculos humanos siguieron siendo motores primarios indispensables en todas las sociedades preindustriales.

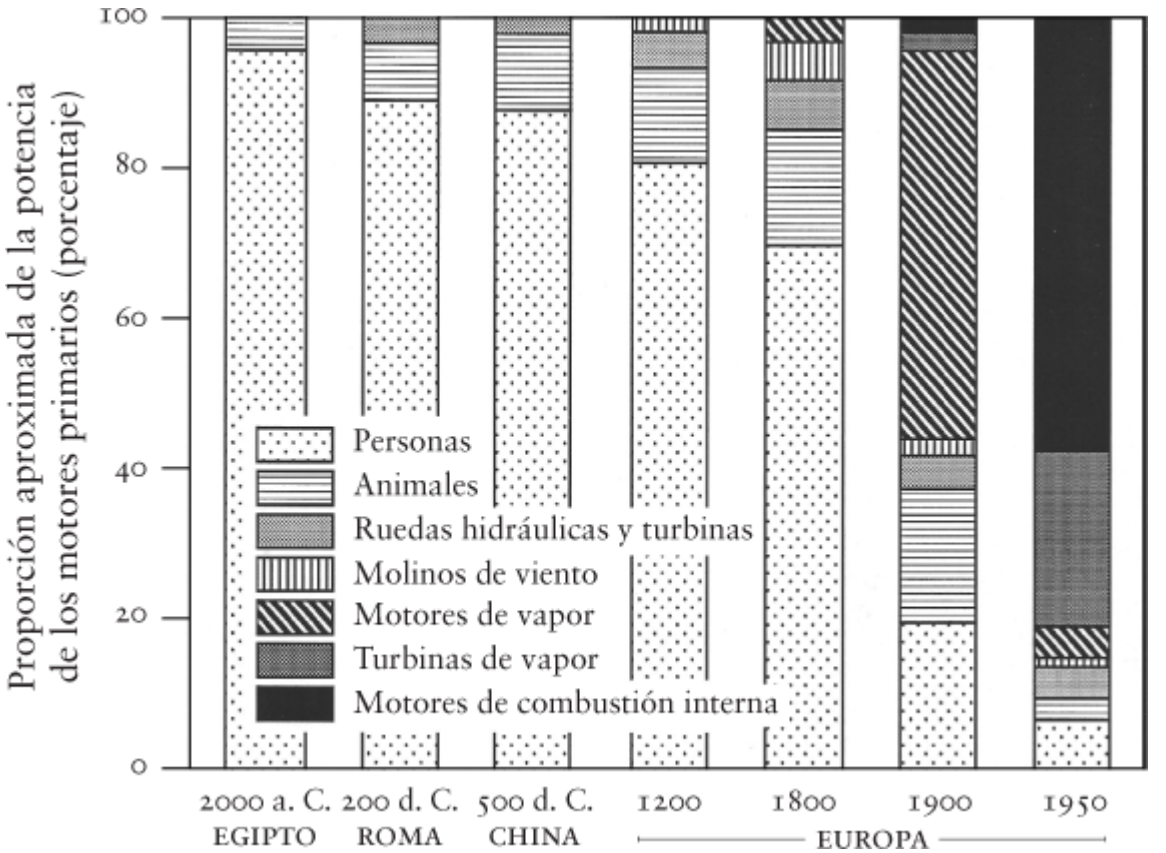


Figura 7.1 Las tres características más notables en la historia de los motores primarios son el prolongado dominio de la mano de obra humana, la lenta difusión de máquinas impulsadas por el agua y el viento, y la rápida adopción, después de 1800, de motores y turbinas. Las proporciones aproximadas se han estimado y calculado a partir de una amplia variedad de fuentes citadas en este libro.

El trabajo humano estuvo caracterizado por una notable dicotomía en todas las civilizaciones antiguas. En contraste con su despliegue masivo para lograr notables hazañas en el ámbito de las grandes construcciones, las antiguas altas culturas nunca dieron ningún paso hacia la fabricación de bienes a gran escala —estuvieran basadas en la esclavitud, la *corvée* o la mano de obra mayoritariamente libre—. La atomización de la producción siguió siendo la norma (Christ, 1984). Los chinos de la era Han dominaban métodos de producción que podrían haber funcionado a gran escala. Tal vez el más notable fuera el perfeccionamiento de una técnica de fundición de hierro adecuada para producir en masa múltiples piezas prácticamente idénticas de

pequeños artículos metálicos a partir de un solo vertido (Hua, 1983). Pero el mayor horno Han que se ha descubierto mide solo 3 m de ancho y menos de 8 m de largo. Más allá de Europa y América del Norte, la manufactura artesanal de pequeña escala siguió siendo la norma hasta el siglo XX. Obviamente, la falta de transporte terrestre barato jugó en contra de la producción en masa.

El coste de distribución más allá de un radio relativamente pequeño habría superado la economía de escala obtenida con la fabricación centralizada. Y en realidad muchos proyectos de construcción antiguos no requirieron una cantidad extraordinaria de mano de obra. Varios centenares o unos pocos miles de trabajadores trabajando solo 2-5 meses/año podían erigir enormes estructuras religiosas o muros defensivos, cavar largos canales de irrigación y transporte y construir extensos diques en un periodo de 20-50 años. Con todo, la construcción de muchos proyectos grandiosos duró mucho más. La reserva de agua de Kala Wewa, en Sri Lanka, tardó 1.400 años en construirse (Leach, 1959). La construcción y reparación de la Gran Muralla china se extendió por un periodo de tiempo aún más largo (Waldron, 1990). Y un siglo o dos era un periodo del todo habitual para terminar una catedral.

Los primeros motores primarios inanimados comenzaron a generar diferencias notables en algunas regiones de Europa y Asia solo después de 200 d. C. (ruedas hidráulicas) y 900 d. C. (molinos de viento). La mejora gradual de estos dispositivos aceleró o reemplazó numerosas tareas agotadoras y repetitivas, aunque la sustitución del trabajo animado fue lenta y desigual (figura 7.2). En cualquier caso, excepto en el caso del bombeo de agua, las ruedas hidráulicas y los molinos de viento poco podían hacer para facilitar las tareas de campo. Por eso la estimación de Fouquet (2008) para Inglaterra muestra que el esfuerzo humano y animal representaba el 85% de toda la energía utilizada en 1500 e incluso el 87% en 1800 (cuando el agua y el viento suministraban un 12%), pero solo el 27% en 1900, momento en que el vapor había tomado las riendas de la industria. Incluso durante la

era de la máquina de vapor, la mano de obra animada siguió siendo indispensable para la extracción y distribución de combustibles fósiles e innumerables tareas de fabricación, mientras que en el ámbito agrícola fue dominante durante todo el siglo XIX (recuadro 7.1).

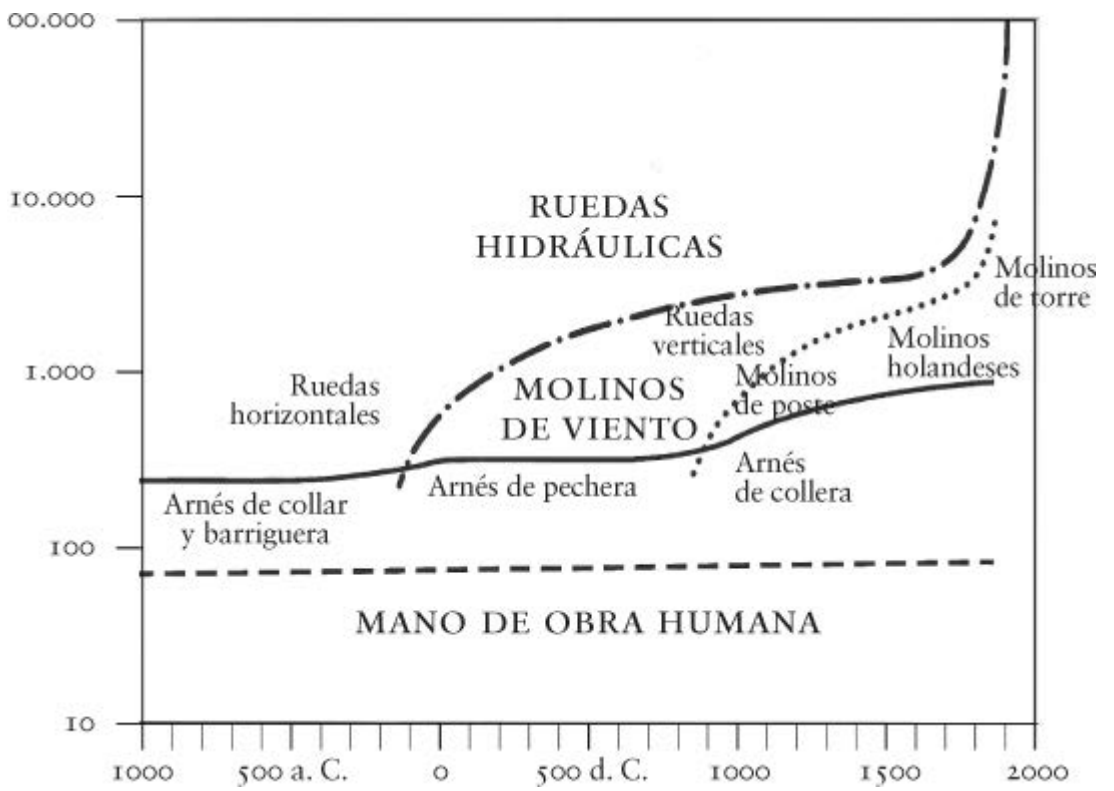


Figura 7.2 La potencia media de los motores primarios tradicionales siguió siendo limitada incluso después de la adopción de ruedas hidráulicas más grandes al principio de la era moderna. El cambio vino con las máquinas de vapor del siglo XIX. Las capacidades máximas se han establecido a partir de fuentes específicas relativas a cada motor primario citadas en este libro.

Mucho antes de que la máxima potencia de los animales de trabajo se triplicara (gracias al uso de grandes caballos con colleras), las ruedas hidráulicas se convirtieron en los motores primarios más potentes. Su desarrollo posterior fue lento: la primera decuplicación de la capacidad máxima requirió 1.000 años y la segunda, 800. Su potencia unitaria máxima fue finalmente superada por la máquina de vapor a finales del siglo XVIII, aunque en la práctica su dominio terminó con la llegada y la difusión del motor de combustión interna y

la turbina de vapor, que entraron en funcionamiento durante la década de 1880, se hicieron comunes durante la década de 1920 y a principios del siglo XXI siguen siendo los motores primarios (móvil y estacionario respectivamente) dominantes en todo el mundo.

RECUADRO 7.1

La persistencia de la energía animada

En América, la mayor parte de las tierras cultivadas actuales son el resultado del trabajado de las cuadrillas de caballos, mulas y bueyes que araron las extensas praderas de las Grandes Llanuras, en Estados Unidos, las praderas canadienses, el cerrado brasileño y la pampa argentina durante las últimas décadas del siglo XIX y las primeras del siglo XX. El Departamento de Agricultura de Estados Unidos contabilizó los animales de tiro que había en el país hasta el año 1963, cuando la potencia de todos los tractores del país era doce veces mayor que la potencia récord que alcanzaron los animales de tiro en 1920. En China, durante las últimas décadas de la dinastía Qing y las primeras de la República, la contribución de los molinos de viento, las ruedas hidráulicas y el vapor todavía era marginal comparada con la de la mano de obra humana, cuya potencia agregada también superaba con creces la de los animales de tiro. Incluso en 1970 el trabajo humano en China generó 200 PJ de energía útil, en comparación con los poco más de 90 PJ de los animales de tiro de todo el país (Smil, 1976).

La dominación de los músculos humanos limitó las unidades de trabajo individual más habituales a 60-100 W de trabajo útil sostenido (de un día de duración). Esto significa que, excepto en contadas ocasiones, las mayores concentraciones de energía de trabajo humano bajo un único mando (entre cientos y miles de trabajadores en obras de construcción) no representaron un esfuerzo sostenido de más de 10.000-100.000 W, aunque picos muy breves pudieran multiplicar esas tasas. Así, un arquitecto maestro tradicional o un constructor de canales controlaba un flujo de energía equivalente (no superior) al de una pequeña máquina excavadora actual.

A pesar de algunas importantes diferencias continentales y regionales, los niveles típicos de consumo de combustible y los usos

predominantes de los motores primarios en las antiguas altas culturas fueron bastante similares. Si hubiera que destacar una sociedad antigua por sus notables avances en el uso de combustibles y el desarrollo de motores primarios, sería la China Han (207 a. C.-220 d. C.). Sus innovaciones fueron adoptadas en otros lugares siglos (o incluso más de un milenio) más tarde. Las contribuciones más notables de los chinos Han fueron el uso del carbón en la fabricación de hierro, la perforación en busca de gas natural, la fabricación de acero a partir de hierro fundido, el uso generalizado de vertederas de hierro curvadas, el uso inicial de arneses de collera y el uso de la sembradora multitubular. No hubo un conjunto similar de avances tan importantes durante más de un milenio.

El islam inicial trajo consigo innovadores diseños de máquinas de elevación de agua y molinos de viento, y el comercio marítimo del reino se benefició del uso eficaz de velas triangulares. Pero el mundo islámico no introdujo ninguna innovación radical en el uso de combustibles, la metalurgia o el aprovechamiento de la energía animal. Hubo que esperar a que la Europa medieval adoptara técnicas chinas, indias y árabes de manera muy ecléctica para innovar de manera crítica. Lo que realmente diferenció a las sociedades medievales europeas en términos de consumo de energía fue su creciente dependencia respecto a la energía cinética del agua y el viento. Estos flujos fueron aprovechados por máquinas cada vez más complejas, proporcionando concentraciones de energía sin precedentes para decenas de aplicaciones. En la época de las primeras grandes catedrales góticas, las mayores ruedas hidráulicas tenían una potencia de 5 kW, equivalente a más de sesenta hombres. Mucho antes del Renacimiento algunas regiones europeas se volvieron extremadamente dependientes del agua y el viento, primero para la molienda de grano y luego para el enfurtido de telas y la metalurgia del hierro. Esta dependencia también contribuyó a la mejora y difusión de muchas habilidades mecánicas.

La Europa medieval tardía y la Europa moderna temprana fueron, por tanto, un lugar de innovación creciente, pero, como atestiguan informes de viajeros europeos contemporáneos que admiran las riquezas del Reino Celestial, la destreza técnica general de la China de la época debía de ser más impresionante. Esos viajeros no podían imaginarse cuán pronto sería al revés. A finales del siglo XV Europa había entrado de pleno en una senda de innovación y expansión aceleradas, mientras que la elaborada civilización china estaba a punto de iniciar un periodo de larga y profunda involución técnica y social. La superioridad técnica occidental no tardó mucho en transformar las sociedades europeas y extender su alcance a otros continentes.

En 1700 los niveles chino y europeo de consumo de energía —y, por tanto, de riqueza material— todavía eran muy similares. A mediados del siglo XVIII los ingresos reales de los trabajadores de la construcción en China eran similares a los de las regiones menos desarrolladas de Europa, pero iban a la zaga de las principales economías del continente (Allen *et al*., 2011). Entonces los avances occidentales cobraron velocidad. En el ámbito de la energía quedaron patentes por la combinación del aumento del rendimiento de las cosechas, la nueva metalurgia del hierro a base de coque, la mejora de la navegación, el progreso en el diseño de las armas, la preferencia por el comercio y la pasión por la experimentación. Pomeranz (2002) sostuvo que este despegue no tuvo tanto que ver con las instituciones, la cultura o la demografía de las regiones económicas centrales de Europa y China como con la ubicación geográfica del carbón y las muy diferentes relaciones entre estos núcleos y sus respectivas periferias, así como con el proceso de invención en sí.

Otros ven los cimientos de este éxito en la Edad Media. En particular, el efecto favorable del cristianismo en los avances técnicos en general (incluido el concepto crítico de la dignidad del trabajo manual) y la pulsión de autosuficiencia del monacato medieval fueron importantes ingredientes de este proceso (White, 1978; Basalla, 1988). Incluso Ovitt (1987), que cuestiona la importancia de los vínculos

citados más arriba, reconoce que la tradición monástica, al defender la dignidad fundamental y la utilidad espiritual del trabajo, fue un factor de progreso positivo. En cualquier caso, en 1850 las regiones económicamente más avanzadas de China y Europa eran dos mundos diferentes, y en 1900 estaban separadas por una enorme brecha de rendimiento: el consumo energético en Europa occidental era cuatro veces mayor que el promedio chino.

El periodo de progreso muy rápido después de 1700 fue catalizado por inventores prácticos y creativos. Los grandes éxitos del siglo XIX se debieron a la estrecha relación entre el desarrollo del conocimiento científico y el diseño y la comercialización de nuevos inventos (Rosenberg y Birdzell, 1986; Mokyr, 2002; Smil, 2005). Los fundamentos energéticos de los avances del siglo XIX incluyen el desarrollo del motor de vapor y su adopción generalizada como motor primario tanto estacionario como móvil, la fundición de hierro a base de coque, la producción de acero a gran escala y la aparición del motor de combustión interna y la generación de electricidad. El alcance y la rapidez de estos cambios procedieron de una combinación novedosa de todas estas innovaciones energéticas con nuevas síntesis químicas y mejores modos de organizar la producción fabril. El desarrollo agresivo de nuevas formas de transporte y telecomunicaciones también fue crítico tanto para impulsar la producción como para promover el comercio nacional e internacional.

En 1900 la acumulación de innovaciones técnicas y organizativas dio a Occidente —que ahora incluye el nuevo poder de Estados Unidos— una cuota sin precedentes de energía global. Con solo el 30% de la población mundial, las naciones occidentales consumían el 95% de los combustibles fósiles. Durante el siglo XX el mundo occidental multiplicó su consumo energético por quince. Inevitablemente, su participación en el consumo energético mundial disminuyó, pero, a finales del siglo XX, la Unión Europea y América del Norte consumían casi el 50% de la energía comercial primaria con

menos del 15% de la población mundial. Hoy en día Europa y América del Norte siguen siendo los principales consumidores per cápita de combustibles y electricidad y han conservado el liderazgo técnico, si bien el rápido crecimiento económico chino ha cambiado la clasificación absoluta: China se convirtió en el mayor consumidor mundial de energía en 2010; en 2015 estaba un 32% por delante de Estados Unidos, aunque su consumo energético per cápita era solo un tercio de la media de Estados Unidos (BP, 2016).

Solo pueden hacerse estimaciones genéricas de los patrones de largo plazo de consumo de energía primaria en el Viejo Mundo (figura 7.3). En Reino Unido, el carbón superó a la madera durante el siglo XVII; en Francia y Alemania, la madera no retrocedió rápidamente en importancia hasta después de 1850; y en Rusia, Italia y España, la biomasa tradicional siguió siendo dominante en el siglo XX (Gales *et al*., 2007; Smil, 2010a). Una vez que se dispone de estadísticas básicas de energía, es posible cuantificar las transiciones y discernir las largas olas de sustitución (Smil, 2010a; Kander, Malanima y Warde, 2013). En términos globales, esto puede hacerse con bastante precisión desde mediados del siglo XIX (figura 7.3). Las tasas de sustitución han sido lentas, pero —considerando la variedad de factores en juego— sorprendentemente similares.

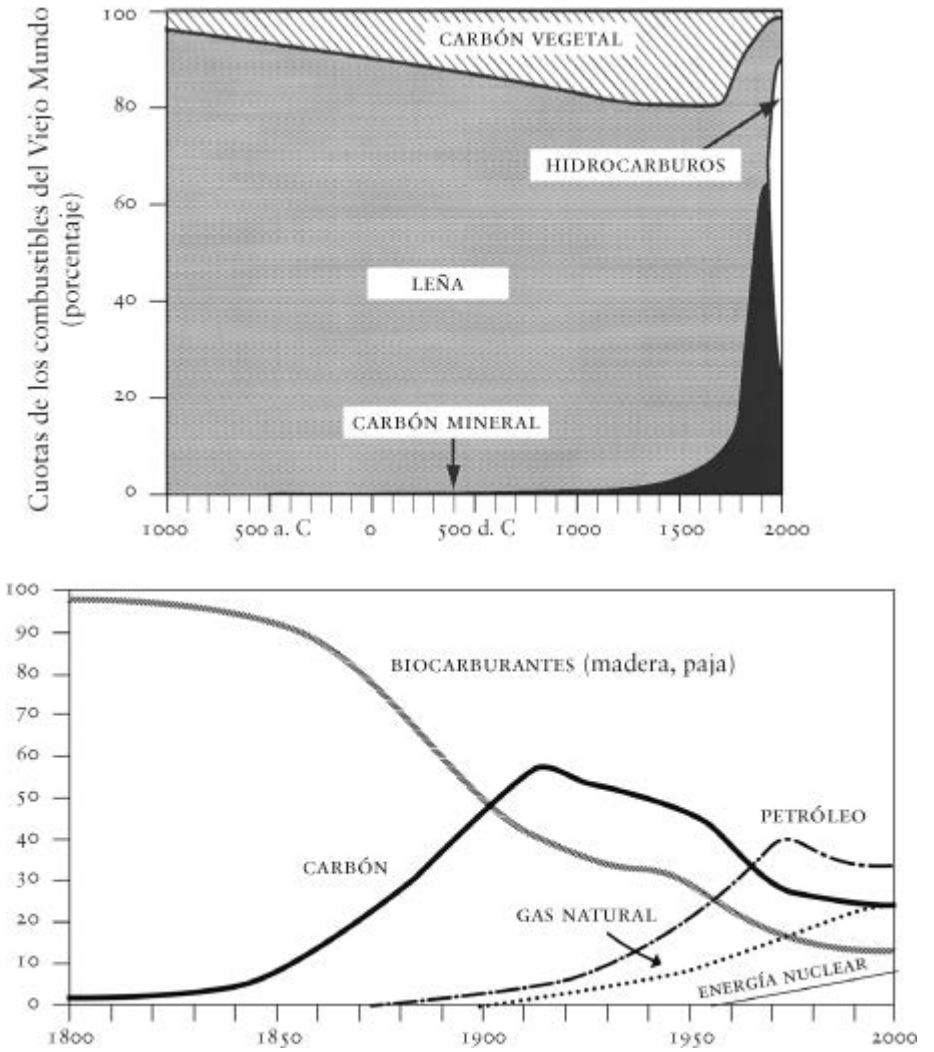


Figura 7.3 Estimaciones aproximadas muestran la cuota de los principales combustibles en el suministro de energía primaria del Viejo Mundo durante los últimos 3.000 años (arriba). Estadísticas razonablemente precisas (excepto el consumo de combustibles de biomasa tradicionales) posteriores a 1850 revelan oleadas sucesivas de transiciones energéticas lentas (abajo): en 2010 el petróleo era el principal combustible fósil, aunque el carbón y el gas natural no estaban muy atrás. Fuentes: ONU (1956) y Smil (2010a).

Mi reconstrucción de las transiciones energéticas mundiales muestra que el carbón (que reemplaza a la madera) alcanza el 5% del mercado mundial en 1840, el 10% en 1855, el 15% en 1865, el 20% en 1870, el 25% en 1875, el 33% en 1885, el 40% en 1895 y el 50% en 1900 (Smil, 2010a). En años, la secuencia es la siguiente: 15-25-30-35-45-55-60. La sustitución del petróleo por el carbón (con un 5% de

la oferta mundial en 1915) sigue prácticamente el mismo patrón: 15-20-35-40-50-60 (aunque el petróleo no alcanzará nunca el 50% y, de hecho, su proporción está en retroceso). El gas natural alcanzó el 5% de la oferta de energía primaria mundial en 1930 y el 25% 55 años más tarde (mucho más que el carbón o el petróleo).

La evolución similar de tres transiciones mundiales —son necesarias dos o tres generaciones, es decir, 50-75 años, para que un nuevo recurso se haga con una gran parte del mercado energético mundial— es especialmente notable porque cada combustible requiere diferentes técnicas de producción, distribución y conversión y porque las escalas de sustitución han sido muy diferentes: pasar del 10 % al 20 % de carbón requirió un aumento de la producción anual de dicho combustible de menos de 4 EJ, mientras que pasar del 10% al 20 % de gas natural supuso un incremento adicional de 55 EJ/año (Smil, 2010a). Los dos factores más importantes a la hora de explicar estas similitudes son los requisitos previos para realizar una enorme inversión en infraestructura y la inercia de los sistemas energéticos existentes.

Aunque la secuencia de tres transiciones no implica que la cuarta transición —la sustitución de los combustibles fósiles por nuevas conversiones de flujos de energía renovable—, ahora en su etapa de desarrollo más temprana, tenga que ocurrir a un ritmo parecido, es muy probable que el proceso sea prolongado. En 2015, las dos nuevas formas renovables de generación de electricidad, la solar (con una cuota del 0,4%) y la eólica (con una cuota del 1,4%), todavía estaban por debajo del 2% del suministro de energía primaria mundial (BP, 2016). Dos avances podrían acelerar el cambio: la rápida construcción de nuevas centrales nucleares basadas en los mejores diseños disponibles actualmente y la disponibilidad de nuevas formas de almacenamiento de electricidad solar y eólica a gran escala y suficientemente baratas. Y, aun así, nos enfrentaríamos a dos grandes retos: la sustitución de miles de millones de toneladas de combustibles líquidos de alta densidad energética en el transporte y la producción

de arrabio, cemento, plásticos y amoníaco sin ningún tipo de carbono fósil.

Tendencias a largo plazo y costes decrecientes

Las transiciones hacia motores primarios más potentes pueden trazarse con precisión en términos de capacidades típicas y máximas (figura 7.4). La potencia máxima de los motores primarios pasó de 100 W de trabajo humano sostenido a 300-400 W para los animales de tiro en algún momento durante el tercer milenio a. C; luego se elevó a 5.000 W (5 kW) con la llegada de las ruedas hidráulicas horizontales a finales del primer milenio d. C. En 1800 los motores de vapor superaron los 100.000 W (100 kW); fueron los motores más potentes hasta mediados del siglo XIX, cuando las turbinas de agua alcanzaron los 10 MW, obteniendo una primacía efímera entre 1850 y 1910. Desde entonces, los motores primarios (de una sola unidad) más potentes han sido las turbinas de vapor, alcanzando una meseta de más de 1.000.000.000 W (1 GW) en las unidades más grandes instaladas después de 1960.

Si observamos la capacidad total instalada de los motores primarios, se obtiene una perspectiva diferente. Después de 1700 el patrón básico mundial se conoce razonablemente bien, y en el caso de Estados Unidos existen estadísticas históricas precisas (figura 7.5). En 1850 el trabajo humano y animal todavía representaba más del 80 % de la potencia de los motores primarios del mundo. Medio siglo más tarde, su cuota era de un 60%. Las máquinas de vapor suministraban alrededor de un tercio. En 2000 toda la potencia disponible en el mundo, excepto una fracción mínima, provenía de motores de combustión interna y generadores de electricidad. Los cambios de motores primarios en Estados Unidos precedieron a estos cambios globales. Por supuesto, los motores de combustión interna (ya sea en vehículos, tractores, cosechadoras o bombas) rara vez se utilizan de manera tan continua como los generadores de electricidad. Los automóviles y las máquinas agrícolas suelen funcionar menos de 500

h/año, en comparación con las más de 5.000 h/año de los turbogeneradores. Por tanto, en términos de producción de energía real, la relación global entre los motores de combustión interna y los generadores de electricidad es hoy de aproximadamente 2:1.

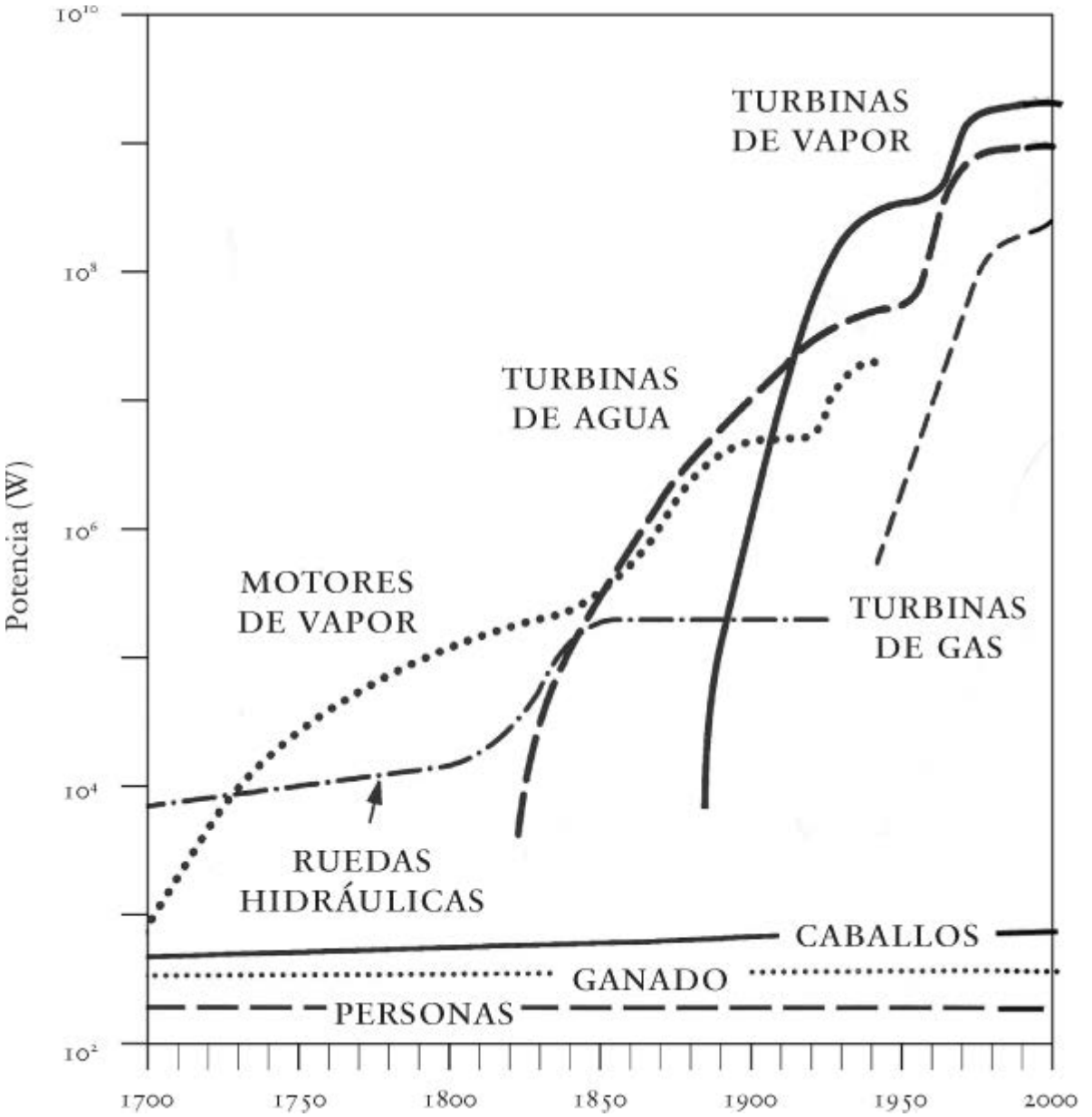


Figura 7.4 Potencia máxima de motores primarios anteriores a 1700 e introducidos durante los últimos tres siglos. Los mayores turbogeneradores son ahora seis órdenes de magnitud (casi dos millones de veces) más potentes que los caballos de tiro pesados, los motores primarios animados más potentes. Los motores de vapor superaron la potencia de las ruedas hidráulicas antes de 1750; en 1850 las turbinas hidráulicas se convirtieron brevemente en los motores primarios más potentes, y las turbinas de vapor han sido los motores primarios más potentes desde la segunda década del siglo XX.

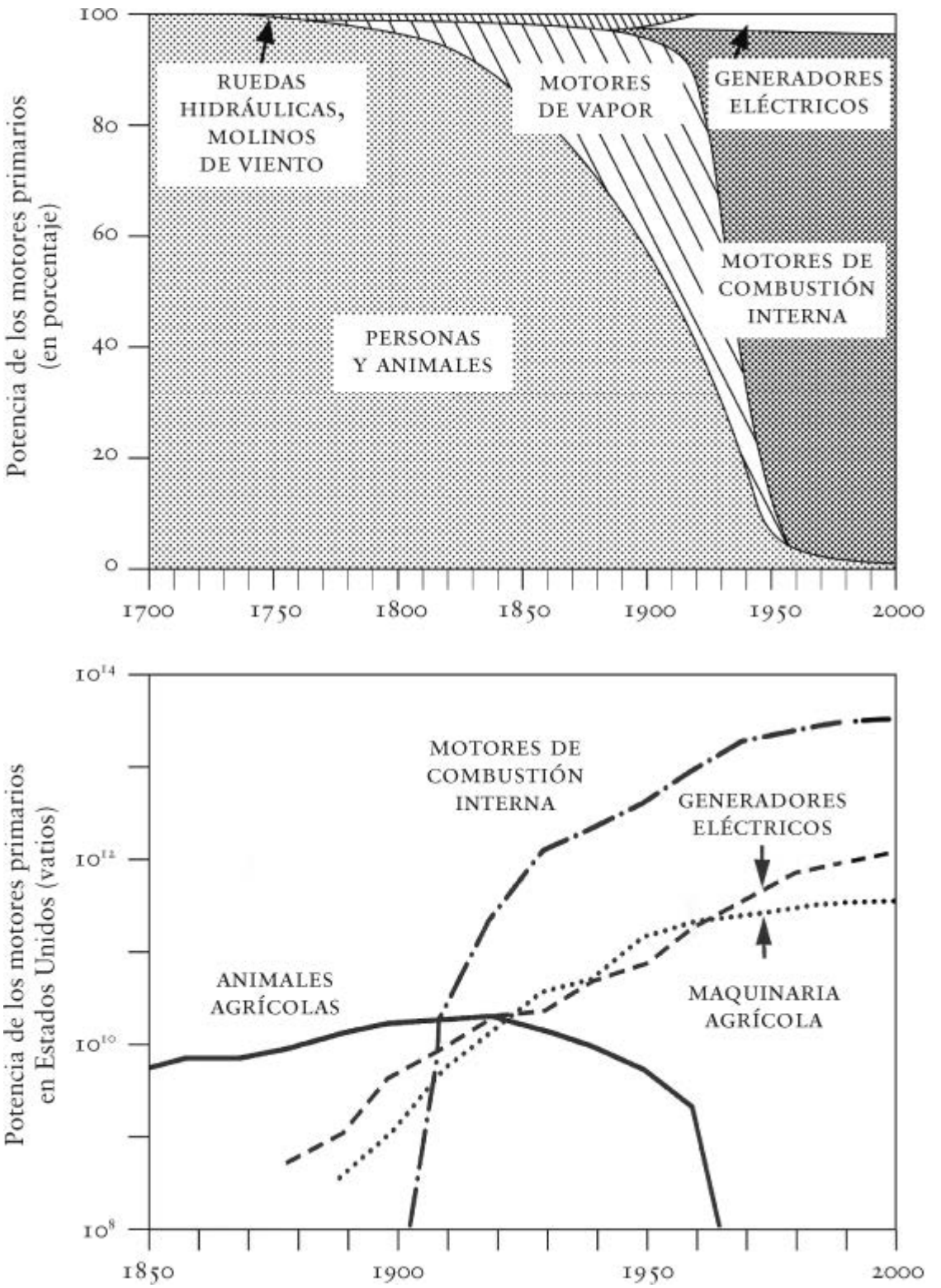


Figura 7.5 Las cuotas de los motores primarios mundiales en 1700 eran solo marginalmente diferentes de las de hace 500 o incluso 1.000 años. En cambio, en 1950 toda la energía disponible en el mundo, salvo una fracción muy pequeña,

provenía de motores de combustión interna (principalmente en automóviles de pasajeros) y turbinas de vapor y agua (arriba). Las estadísticas desagregadas de Estados Unidos (abajo) muestran esta rápida transformación con mayor detalle y precisión. Fuentes: ONU (1956), Smil (2010a) y Palgrave Macmillan (2013); USBC (1975) y ediciones posteriores de *The Statistical Abstract of the United States*.

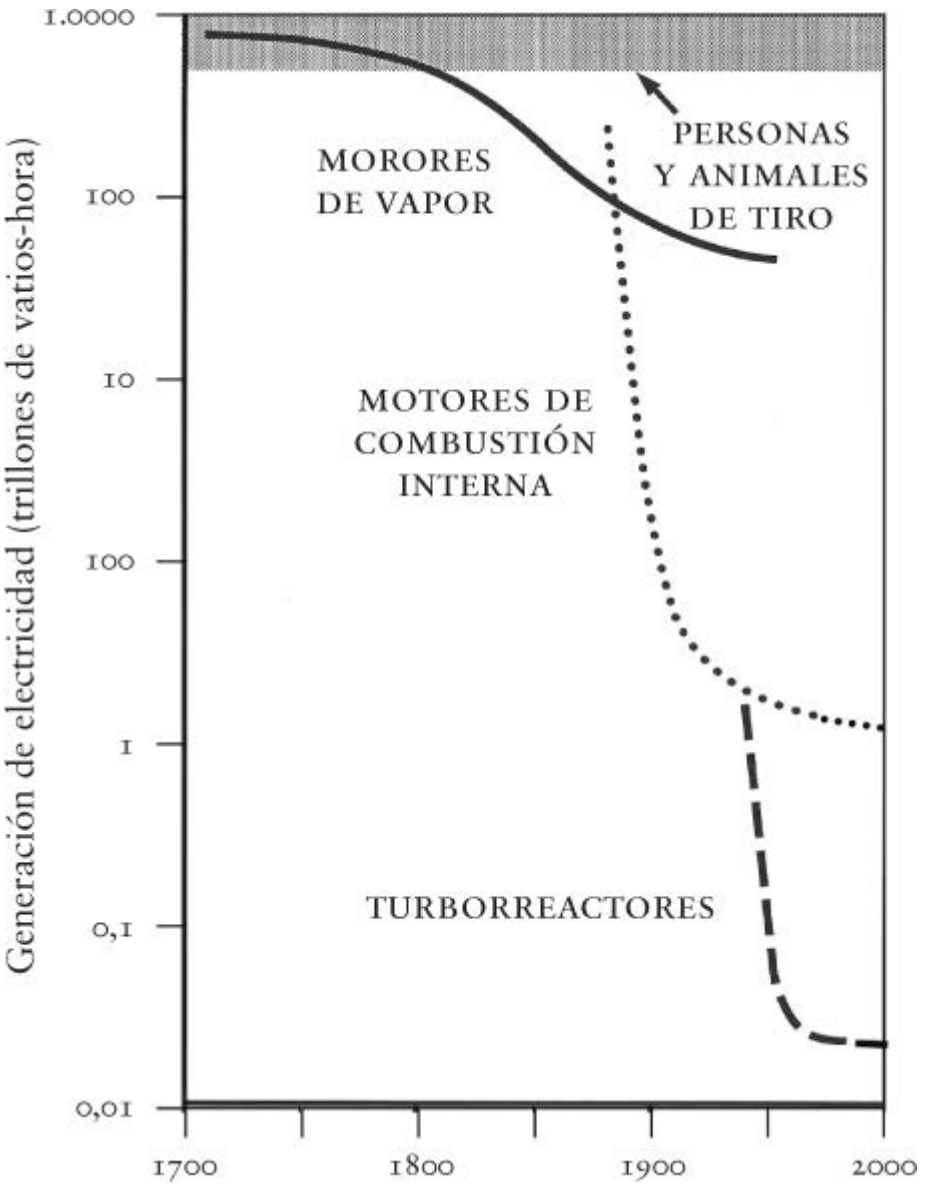


Figura 7.6 Cada nuevo convertidor de energía inanimada se volvió con el tiempo mucho más ligero y eficiente. La constante disminución de la relación peso/potencia de los principales motores primarios significa que los mejores motores de combustión interna pesan ahora menos de 1/1.000 de lo que pesaban los animales de tiro o los primeros motores de vapor igual de potentes. Hecho con datos citados a lo largo del libro.

El crecimiento de la potencia unitaria de los motores primarios inanimados, así como la acumulación de su potencia total, han venido acompañados de dos importantes tendencias generales: la relación masa/potencia ha disminuido (generando más potencia por unidad de masa) y la eficiencia de conversión ha aumentado (generando más trabajo útil por unidad de energía inicial). La primera tendencia ha traído consigo convertidores de combustible progresivamente más ligeros y, por tanto, más versátiles (figura 7.6). Las primeras máquinas de vapor eran mucho más potentes que los caballos, pero también eran sumamente pesadas porque su relación masa/potencia era del mismo orden de magnitud que la de los animales de tiro. Más de dos siglos de desarrollo e innovación redujeron la relación masa/potencia de los motores de vapor a una décima parte del valor inicial (todavía demasiado alta para que los motores sirvieran en las carreteras o para impulsar el vuelo).

La relación masa/potencia de los motores de combustión interna (primero los de gasolina y luego los diésel) disminuyó en dos órdenes de magnitud en menos de 50 años desde que aparecieran los primeros modelos comerciales (los motores horizontales alimentados con gas ciudad) en la década de 1860. Esa caída precipitada abrió el camino a la mecanización asequible del transporte por carretera (automóviles, autobuses, camiones) e hizo posible la aviación. A partir de la década de 1930 (tanto para uso estacionario como en vuelo), las turbinas de gas llevaron estas mejoras casi otros dos órdenes de magnitud más lejos, haciendo posible el viaje aéreo rápido impulsado por reactores a partir de 1957 y, a gran escala, en 1969, después de la introducción de los reactores de fuselaje ancho, con el Boeing 747 a la cabeza. Al mismo tiempo, las turbinas de gas han surgido como una opción dominante para generar electricidad de manera flexible y limpia.

La eficiencia de los motores principales está limitada por consideraciones termodinámicas fundamentales. El progreso técnico ha reducido las diferencias entre máximos teóricos y mejores prestaciones en la práctica. La eficiencia de las máquinas de vapor

pasó de menos del 1% en el caso de los primitivos motores de Savery a poco más del 40% para los grandes turbogeneradores de principios del siglo XXI. Actualmente solo es posible realizar mejoras marginales en los turbogeneradores, sean de vapor o agua, pero los turbogeneradores de gas de ciclo combinado pueden alcanzar eficiencias del 60%. Del mismo modo, las mejores cámaras de combustión ahora funcionan cerca de su límite teórico. Tanto las grandes calderas de las centrales eléctricas como las calderas domésticas de gas natural pueden alcanzar una eficiencia de hasta el 97%. Por el contrario, el rendimiento diario de los motores de combustión interna, los motores primarios con la mayor potencia instalada agregada del mundo, es todavía muy bajo. Los motores de los coches mal equipados suelen funcionar a menos de un tercio de su capacidad máxima. Las mejoras en la eficiencia de la iluminación han sido aún más impresionantes (recuadro 7.2).

El desarrollo de motores primarios mecánicos más potentes, eficientes y ligeros ha multiplicado por más de diez la velocidad típica de los viajes de larga distancia en tierra y agua, además de hacer posible el vuelo (figura 7.7). En 1800 los coches de caballos solían recorrer menos de 10 km/h; los vagones de carga pesada se desplazaban a la mitad de esa velocidad. En 2000 el tráfico de las autopistas fluía a velocidades superiores a 100 km/h y los trenes de pasajeros de alta velocidad circulaban a velocidades cercanas (o incluso superiores) a los 300 km/h, mientras que la velocidad de crucero estándar de los aviones de reacción es de 880-920 km/h a 11 km de la superficie terrestre. El aumento de la velocidad ha ido de la mano del aumento de la capacidad y el alcance del transporte de mercancías y personas.

RECUADRO 7.2

Eficiencia y eficacia de la iluminación

Las velas solo convierten un 0,01-0,04% de la energía química de la cera, el sebo o la parafina en luz. Las primeras bombillas de Edison, que usaban filamento de carbono atado a abrazaderas de platino e hilos conductores de platino sellados a través del vidrio, convertían un 0,2% de la energía eléctrica en luz, un orden de magnitud más que las velas, pero igual que el del alumbrado de gas de la época (0,15-0,3%). Los filamentos de osmio, introducidos en 1898, convertían el 0,6% de la energía eléctrica en luz. Esta tasa se duplicó con creces después de 1905 con la llegada de filamentos de tungsteno en el vacío, y luego se duplicó de nuevo con el uso de gases inertes en las bombillas. En 1939 la primera luz fluorescente llevó la eficiencia por encima del 7% y después de la Segunda Guerra Mundial las tasas se elevaron muy por encima del 10% (Smil, 2006).

Pero la mejor manera de apreciar este progreso es medir la eficacia luminosa. Esta relación de flujo luminoso y radiante (expresada en lúmenes por vatio, lm/W) mide la eficiencia con la que una fuente de energía radiante produce luz visible, y su máximo es 683 lm/W. Esta es la escala de eficacias luminosas de diferentes tecnologías, todas en lm/W (Rea, 2000): vela, 0,3; alumbrado de gas, 1-2; bombillas incandescentes tempranas, menos de 5; bombillas incandescentes modernas, 10-15; luces fluorescentes, hasta 100. Actualmente la fuente de luz comercial más eficiente son las lámparas de sodio de baja presión (con máximos justo por encima de 200 lm/W), pero su luz amarilla se utiliza solo para el alumbrado público. Los diodos emisores de luz, adecuados para cualquier aplicación en interior, ya ofrecen casi 100 lm/W y pronto superarán 150 lm/W (USDOE, 2013).

En el transporte terrestre, esta evolución mecánica ha llevado recientemente a la aparición de camiones de más de dos ejes, trenes unitarios (que transportan hasta 10.000 t de material a granel) y trenes eléctricos de pasajeros rápidos (para hasta 1.000 personas). Los superpetroleros mueven hasta 500.000 t de crudo, mientras que los mayores aviones de pasajeros, el Boeing 747 y el Airbus 380, transportan 500 personas, y el mayor avión de carga, el Antonov 225, puede llevar 250 t. El aumento de la autonomía ha sido igualmente impresionante: la mayor distancia que puede cubrir un coche de pasajeros sin repostar es ahora de 2.600 km —récord alcanzado en

2012 con el Volkswagen Passat TDI (Quick, 2012)— y el Boeing 777-200LR puede volar más de 17.500 km.

La contrapartida violenta del aumento de la velocidad y el alcance del transporte de pasajeros y mercancías fue el aumento de la velocidad, el alcance y la potencia efectiva de los proyectiles liberados por armas. El rango de muerte de una lanza era de pocas decenas de metros (un lanzador experto podía llevar esta distancia hasta más de 60 m). Los buenos arcos compuestos podían enviar flechas a 500-700 m. Este también era el rango de las ballestas más potentes. Algunas catapultas podían lanzar piedras de 20-150 kg a 200-500 m. El alcance creció rápidamente cuando los músculos fueron sustituidos por pólvora. Poco antes de 1500, los cañones más pesados podían disparar bolas de hierro de 140 kg a 1.400 m y bolas de piedra más ligeras al doble de distancia (Egg *et al*., 1971).

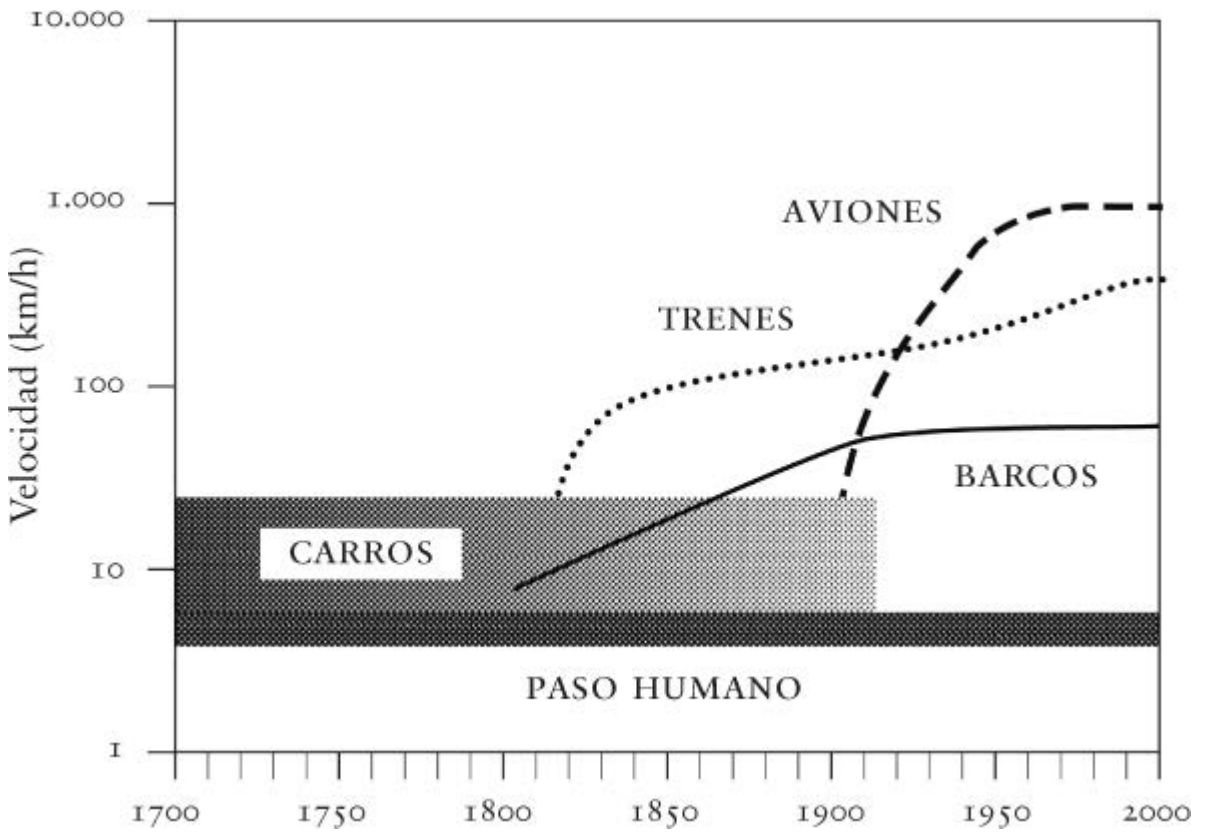


Figura 7.7 La velocidad máxima del transporte de pasajeros pasó de menos de 20 km/h para los coches de caballos de la era preferroviaria a más de 100 km/h para las mejores locomotoras en apenas unas décadas. Los trenes rápidos modernos suelen viajar a 200-300 km/h y los aviones de pasajeros a velocidades ligeramente superiores a los 900 km/h.

A principios del siglo XX, los grandes cañones de campaña, cuyo alcance había alcanzado varias decenas de kilómetros, perdieron su primacía en la destrucción de larga distancia en favor de los bombarderos. A su vez, los bombarderos —capaces de enviar hasta 9 t de bombas a más de 6.000 km de distancia al final de la Segunda Guerra Mundial— fueron superados por los misiles balísticos (Spinardi, 2008). Desde principios de la década de 1960, estos misiles podían lanzar bombas nucleares más potentes con mayor precisión, ya sea desde silos terrestres o submarinos a cualquier lugar de la Tierra. El aumento del rango se ha multiplicado por 30.000 desde el arco compuesto del Viejo Mundo hasta un misil balístico actual, mientras

que un misil tiene un poder destructivo 16 órdenes de magnitud mayor que el de una flecha.

Las tendencias de consumo a largo plazo, tanto en términos absolutos como relativos, no han sido menos impresionantes. A escala mundial, el flujo total de energía primaria, incluidos los combustibles de biomasa tradicionales, alcanzó 20 EJ en 1800, casi 45 EJ en 1900, 100 EJ en 1950, poco más de 380 EJ en el año 2000 y más de 550 EJ en 2015. Esto significa que la potencia anualizada pasó de 650 GW en 1800 a 12,2 TW en 2000, un aumento de casi veinte veces en dos siglos, y en 2015 había aumentado otro 40%, hasta 17,5 TW. Entre 1800 y 2000 la extracción de combustibles fósiles se multiplicó por casi 900, pasando de menos de 0,4 EJ a más de 300 EJ. El aumento del consumo energético ha modificado profundamente los niveles absolutos y relativos de consumo per cápita.

En las sociedades de cazadores-recolectores el consumo energético estaba dominado por el suministro de alimentos, ropa básica y refugios provisionales. Las antiguas altas culturas invirtieron su lentamente creciente consumo energético en refugios permanentes, una mayor variedad de alimentos cultivados y procesados, mejor vestimenta y transporte, y una variedad de productos manufacturados (siendo el carbón la principal fuente de suministro de calor empleado para fundir materiales y cocer ladrillos). Las sociedades industriales tempranas —con más animales domésticos, la energía cinética de las ruedas hidráulicas y los molinos de viento y una creciente extracción de carbón— duplicaron el consumo energético per cápita habitual en la Alta Edad Media.

Inicialmente, la mayor parte de este incremento se destinó a la manufactura, la construcción y el transporte (incluido el desarrollo de grandes infraestructuras), pero el eventual aumento del consumo privado discrecional de energía no queda reflejado en los informes habituales sobre consumo energético sectorial. Por ejemplo, los números de la Agencia Internacional de la Energía dicen que en 2013 solo el 12% del consumo de energía primaria de Estados Unidos fue

residencial, mientras que la Administración de Información Energética de Estados Unidos situó esa proporción (incluyendo toda la electricidad y las pérdidas en su generación) en el 22%, cuando la proporción real (incluyendo una gran parte del consumo energético clasificado como comercial y de transporte) es muy superior al 30%.

Como la producción de energía per cápita de Estados Unidos ya era bastante alta en 1900, durante la primera década del siglo XXI esa misma tasa fue «solo» 2,5 veces mayor (330 frente a 132 GJ/cápita). En Japón el consumo per cápita se multiplicó por quince entre 1900 y 2015, y en China casi por diez. Debido a la mejora constante de la eficiencia media de conversión, el crecimiento del consumo de energía útil per cápita ha sido mucho mayor: dependiendo del país, se ha multiplicado por entre cuatro y cincuenta durante el siglo XX. Con una eficiencia energética global inferior al 20%, en 1900 Estados Unidos no consumía más de 25 GJ/t de energía útil; en 2000, con una eficiencia media del 40%, la tasa era de 150 GJ/cápita, una multiplicación por seis en un siglo. Mi estimación para China muestra un cambio de 0,3 GJ/cápita de energía útil en 1950 a 15 GJ/cápita en 2000, una multiplicación por cincuenta en solo dos generaciones.

Los datos de Fouquet (2008) sobre Reino Unido sirven para ilustrar este progreso en las principales categorías de consumo de energía durante 250 años, entre 1750 y 2000. En el caso de la energía industrial (que en 1750 era proporcionada por mano de obra animada, ruedas hidráulicas, molinos de viento y algunos motores de vapor, y en 2000 principalmente por motores eléctricos y motores de combustión interna) el múltiplo fue de trece en 250 años. Para la calefacción de espacios, de catorce. Para el transporte de pasajeros (en 1750, caballos, carros, autobuses, barcazas y veleros; en 2000, vehículos y embarcaciones con motores de combustión interna y aviones de reacción) fue de casi 900. Y como ya se ha señalado, el progreso más importante fue el de la iluminación, pues el británico medio consumía 11.000 veces más luz en 2000 que en 1750.

Estas estadísticas, que dibujan el crecimiento de los servicios energéticos útiles, son la métrica energética más reveladora, ya que explica las enormes ganancias en capacidad productiva, calidad de vida, movilidad y (si un extraterrestre inteligente echara un vistazo) tanta luz que las imágenes nocturnas de los satélites muestran grandes regiones de Europa, América del Norte y Asia como parches brillantes permanentes. Por otro lado, la mejora de la eficiencia energética ha sido digerida por el crecimiento de la demanda y el crecimiento demográfico, y, aunque la economía mundial se ha vuelto relativamente menos intensiva en energía, su consumo energético agregado ha ido en aumento, de tal manera que la demanda energética media per cápita solo ha alcanzado un tope en las tres últimas décadas en algunas economías avanzadas.

Al mismo tiempo, la energía utilizada para satisfacer necesidades vitales se ha convertido en una parte cada vez más pequeña del consumo total: la producción de una infinidad de bienes de consumo, la prestación de innumerables servicios y las actividades de transporte y ocio consumen ahora el grueso de los combustibles y la electricidad en todos los países ricos; y lo mismo ocurre con el creciente número de urbanitas prósperos de los grandes países en vías de desarrollo rápido, sobre todo China, la India y Brasil. Y la mejora de la eficiencia a largo plazo ha sido la causa eficiente más importante de la reducción sustancial del precio de la energía (comparados en términos reales y ajustados a la inflación).

Kander (2013) mostró que durante el siglo xx el precio real de la energía en Europa Occidental disminuyó en un 75% (entre el 80% en Reino Unido y el 33% en Italia). Fouquet (2008) utilizó datos sobre precios ingleses —algunos de los cuales remontan a la Edad Media— para presentar algunas de las dinámicas de largo plazo más interesantes (siempre en dinero constante o por unidad de rendimiento específico o servicio prestado). Entre 1500 y 2000 el coste de la calefacción doméstica cayó un 90%, el coste de la energía industrial un 92%, el coste del transporte de carga terrestre un 95% y el coste

del transporte de carga marítimo un 98%. Aunque, de nuevo, la caída más impresionante fue la de la iluminación.

La bajada del coste de los combustibles utilizados para generar luz directamente o por medio de la electricidad y el aumento de la eficiencia de los dispositivos de iluminación generaron una reducción del coste de los servicios de iluminación (dinero/lúmenes) que no tiene parangón con ningún otro tipo de conversión energética. En 2000, un lumen de luz en Reino Unido costaba solo el 0,01% de lo que costaba en 1500 y el 1 % de lo que costaba en 1900 (Fouquet, 2008). Según Nordhaus (1998), a finales del siglo XX el coste de la iluminación en Estados Unidos era cuatro órdenes de magnitud más bajo (concretamente, la proporción de la fracción es 0,0003) que en 1800. El precio real de la electricidad cayó un 97-98 % durante el siglo XX tanto en Europa como en América del Norte (Kander, 2013), y dado que esta bajada se combinó con la quintuplicación de la renta disponible per cápita y un aumento de hasta un orden de magnitud de la eficiencia de conversión, en 2000 una unidad de servicio eléctrico en Estados Unidos era entre 200 y 600 veces más asequible que en 1900 (Smil, 2008a). Desde el año 2000 el gasto energético total de una familia estadounidense media ha sido de solo 4-5 % de su ingreso disponible, lo cual representa una auténtica ganga considerando el tamaño típico de la vivienda y la intensidad del transporte en Estados Unidos (USEIA, 2014).

Todos estos datos muestran una tendencia indiscutible. Al mismo tiempo, debemos tener en cuenta que casi todas estas trayectorias serían distintas si el precio de la energía hubiera reflejado correctamente una serie de externalidades, en particular el impacto ambiental y sanitario asociado a la extracción, el transporte, el procesamiento y la quema de combustibles y las diversas formas de generación de electricidad, cosa que no ha ocurrido nunca en ningún lugar. Algunas externalidades, como la captura de partículas en suspensión y la desulfuración de gases de combustión, han sido en gran parte internalizadas, mientras que otras permanecen

completamente ignoradas. En particular, ningún combustible fósil cubre el eventual coste del calentamiento global generado por el CO_2. Además, la mayoría de precios energéticos —tanto en las denominadas economías de libre mercado como en Estados con políticas económicas dirigistas, e independientemente del nivel de ingresos del país— están subvencionados (muchas veces fuertemente subvencionados) mediante externalidades no contabilizadas, tipos impositivos bajos y otros tratamientos preferenciales (recuadro 7.3).

RECUADRO 7.3

Subsidios energéticos

En 2015 el Fondo Monetario Internacional (FMI, 2015) estimó que los subsidios energéticos globales sumaron 5,3 billones de dólares (el 6,5% del producto económico mundial). La mayor parte de los subsidios tuvieron que ver con la infravaloración de impactos ambientales y de salud y otras externalidades (como la congestión del tráfico y los accidentes). China, con su combustión masiva de carbón, fue el principal subvencionador en términos absolutos (2,27 billones de dólares en 2015); en Ucrania, los subsidios representaron el 60% del PIB; y Qatar ocupó el primer lugar de subsidios per cápita, con 6.000 dólares/habitante. También se ha creado una nueva ola de subvenciones energéticas para desarrollar y acelerar la generación solar y eólica, las dos principales formas de producción de electricidad renovable, así como la fermentación de cultivos de carbohidratos para producir etanol para automóviles (Charles y Wooders, 2011; Alberici *et al*., 2014; USEIA, 2015c).

¿Qué no ha cambiado?

Dada la naturaleza fundamental de la historia de la energía, se trata de una pregunta justa. La respuesta obvia y sencilla es que la adopción y la difusión de nuevas fuentes de energía y nuevos motores primarios ha sido la causa física fundamental del cambio económico, social y medioambiental a lo largo de la historia, así como de la transformación completa de las sociedades modernas. Este proceso

nos ha acompañado siempre, pero su ritmo se ha acelerado. El cambio que en la prehistoria generaron el control del fuego y mejores herramientas y estrategias de caza fue muy lento, desarrollándose a lo largo de decenas de miles de años. La posterior adopción e intensificación de la agricultura sedentaria duró milenios. Su mayor consecuencia fue un gran aumento de las densidades de población, que dio lugar a la estratificación social, la especialización ocupacional y la urbanización incipiente. Las sociedades energívoras que resultan del creciente consumo de combustibles fósiles se convirtieron en epítomes del cambio, lo que condujo a una obsesión generalizada por la innovación constante.

Aunque la densidad de las poblaciones de cazadores-recolectores fue muy variable, nunca superó 1 habitante/km^2 (con excepción de unas pocas culturas marítimas). La agricultura itinerante (incluso la menos productiva) elevó esta tasa como mínimo diez veces. El cultivo permanente generó otra multiplicación por diez. La intensificación de la agricultura tradicional requirió más energía. Mientras la mano de obra animada siguió siendo el único motor primario del trabajo de campo, la proporción de la población dedicada al cultivo de plantas y la cría de animales siguió siendo muy alta (más del 80% y comúnmente el 90%). El retorno energético neto de la agricultura intensiva (con irrigación, terrazas, cultivos múltiples, rotación de cultivos y fertilización) era inferior al de la agricultura extensiva, pero permitió densidades de población sin precedentes.

La agricultura tradicional más intensiva —en particular el cultivo múltiple anual en Asia, que sostiene una dieta mayoritariamente vegetariana— solía sostener a más de 5 personas/ha de tierra cultivada. Esta densidad dio lugar a una urbanización gradual, aunque el crecimiento de las ciudades, el comercio extensivo y la integración efectiva de los imperios en expansión se vieron restringidos por la lentitud y la escasa capacidad del transporte terrestre. Las sociedades marítimas, en cambio, se vieron favorecidas por la mejora de la capacidad de los barcos de vela, utilizados tanto para el lucrativo

comercio intercontinental como para el dominio político de largo alcance.

En contraste con la transformación lenta y acumulativa de las sociedades tradicionales, las consecuencias socioeconómicas de la industrialización basada en los combustibles fósiles fueron casi instantáneas. La sustitución de los combustibles de biomasa por combustibles fósiles y la posterior sustitución de la energía animada por la electricidad y los motores de combustión interna crearon un mundo nuevo en muy pocas generaciones (Smil, 2005). La experiencia estadounidense fue un caso extremo de cambio rápido. Más que en cualquier otro país moderno, el poder y la influencia de Estados Unidos son consecuencia de su extraordinario consumo energético (Schurr y Netschert, 1960; Jones, 1971; Jones, 2014; Smil, 2014b). En 1850 Estados Unidos era una sociedad abrumadoramente rural, alimentada con madera y de importancia mundial marginal. Un siglo más tarde —después de haber triplicado su consumo de energía útil per cápita y haberse convertido en el mayor productor y consumidor mundial de combustibles fósiles— era una superpotencia económica y militar (capaz de obtener una victoria clara en la Segunda Guerra Mundial) y el principal escenario de innovación técnica en el mundo.

Las transformaciones físicas más evidentes del mundo fósil tienen que ver con procesos entrelazados de industrialización y urbanización. Ante todo, liberaron a cientos de millones de personas del trabajo físico que hacían anteriormente y trajeron consigo un suministro cada vez mayor y más variado de alimentos y mejores condiciones de vivienda. La combinación de una agricultura más productiva y nuevas oportunidades de trabajo en industrias en expansión condujo a un éxodo rural masivo y una rápida y sostenida urbanización en todos los continentes. A su vez, este cambio ha tenido una enorme repercusión en el consumo energético global. La vida urbana requiere infraestructuras que generan un consumo energético per cápita muy superior al de la vida rural, incluso si las ciudades no están muy industrializadas. Este requisito energético relativamente alto no podría

satisfacerse sin medios de transporte de larga distancia de alimentos y combustible suficientemente baratos, y más adelante sin electricidad.

La mecanización de la fabricación en masa, alimentada con combustibles fósiles y electricidad, ha permitido producir una enorme variedad de bienes de consumo de mucha calidad a un precio asequible. También ha introducido nuevos materiales (metales, plásticos, compuestos) e intensificado enormemente el comercio, el transporte y las telecomunicaciones, que hoy en día son de verdad globales y accesibles para cualquier individuo con ingresos razonables (lo cual de manera inevitable ha generado una evidente masificación y banalización de las experiencias de consumo, cuyo ejemplo más evidente son los ejércitos de turistas que cada día se dan una vuelta superficial por cualquier lugar notable del planeta tomando *selfies* con un palo).

Este proceso también ha acelerado todas las facetas del cambio social. Ha roto el limitado (y limitante) horizonte social y económico tradicional de la gente, facilitando, por una parte, el acceso a miles de millones de personas a través de las redes sociales y, por otra, la deslocalización y subcontratación a menudo contraproducente de actividades industriales (debido al coste de transporte inherentemente más alto y la pérdida frecuente de calidad). Ha mejorado la salud y prolongado la vida en casi todo el mundo (cambio cuya contrapartida es el envejecimiento de la población). Ha difundido tanto la alfabetización básica como la educación superior (aunque la democratización de los títulos universitarios ha reducido su valor) y ha permitido acumular un mínimo de riqueza a un porcentaje cada vez mayor de la población mundial. Asimismo, ha facilitado la expansión de la democracia y los derechos humanos (aunque desde luego no ha logrado que el mundo sea verdaderamente más democrático).

La electricidad merece ser destacada por sus muchas ventajas específicas. Nuestra dependencia respecto a la electricidad —una fuente de energía flexible y conveniente— es total. Sin electricidad, las sociedades modernas no cultivarían o comerían como lo hacen, ya que

la electricidad alimenta los compresores de las fábricas de producción de amoníaco y las neveras domésticas. Tampoco podrían prevenir enfermedades (hoy controladas con vacunas refrigeradas), cuidar a los enfermos (los diagnósticos dependen de máquinas eléctricas, desde los venerables rayos X hasta la más reciente resonancia magnética), controlar las redes de transporte, manejar el enorme volumen de información que generan (los centros de procesamiento de datos están convirtiéndose en enormes consumidores de electricidad) o gestionar las aguas residuales urbanas.

Por supuesto, sin electricidad las sociedades modernas tampoco podrían operar y gestionar las industrias que producen en masa una gama cada vez mayor de bienes de consumo de cada vez mayor calidad a un precio asequible. Este tipo de producción ha borrado casi por completo la vieja división entre una admirable variedad de bienes de lujo producidos a pequeña escala para los más ricos y el limitado surtido de manufacturas de baja calidad disponible para la mayoría. Una proporción creciente de este progreso de la producción ha hallado su camino en el comercio internacional. En 2015 el comercio exterior representó el 25% del producto económico mundial bruto, en comparación con menos del 5% en 1900 (Banco Mundial, 2015c). Esta tendencia se ha acelerado gracias a la telecomunicación electrónica instantánea y la existencia de medios de transporte más rápidos y fiables. Los combustibles fósiles y la electricidad han hecho que el mundo pase de ser un mosaico de autarquías económicas y horizontes culturales limitados a un único conjunto cada vez más interdependiente.

Otra profunda transformación de la era fósil ha sido el desarrollo de nuevas estructuras de relaciones sociales. Tal vez la más importante ha sido un nuevo sistema de distribución de la riqueza. El paso de las clases sociales a los contratos de trabajo ha generado mayor independencia personal y política. Esta transformación ha dado lugar a nuevos regímenes de trabajo (típicamente, horarios fijos y jerarquías organizativas multinivel) y nuevas agrupaciones sociales con intereses

especiales (sindicatos, empresarios, inversores). Casi desde el principio también introdujo nuevos desafíos a nivel nacional, sobre todo la necesidad de gestionar los extremos: el rápido crecimiento industrial regional y el declive económico crónico. Esta disparidad sigue existiendo incluso en los países más ricos. Las barreras comerciales, los subsidios, los aranceles y la propiedad extranjera han causado nuevas tensiones internacionales.

La introducción de nuevas fuentes de energía y nuevos motores primarios también ha tenido un profundo impacto en el crecimiento económico y los ciclos de innovación técnica. Se necesita una inversión inicial sustancial para desarrollar la infraestructura necesaria para extraer (o utilizar) nuevas fuentes de energía, transportar (o transmitir) combustibles y electricidad, procesar combustibles y fabricar en masa nuevos motores primarios. A su vez, la introducción de estas nuevas fuentes de energía y estos nuevos motores primarios genera agrupaciones (*clusters*) de mejoras graduales e innovaciones técnicas fundamentales. La visión clásica de Schumpeter (1939) sobre los ciclos económicos en los países occidentales en vías de industrialización mostró la inequívoca correlación entre nuevas fuentes de energía y nuevos motores primarios, por una parte, y la aceleración de la inversión, por otra (recuadro 7.4, figura 7.8).

Las subsiguientes extensiones de estos largos ciclos funcionan bastante bien. El auge económico de la posguerra estuvo asociado a la sustitución mundial del carbón por los hidrocarburos, el aumento de la generación de electricidad en todo el mundo (incluida la fisión nuclear), la propiedad masiva de automóviles y el consumo masivo de energía en la agricultura. Como ya hemos visto, esta expansión fue detenida por la quintuplicación de los precios del petróleo en 1973. La última ola de innovación ha incluido varios convertidores de energía industriales y domésticos altamente eficientes y avances en la energía fotovoltaica. La rápida difusión de los microchips, el avance de la informática, el desarrollo de la fibra óptica, la introducción de nuevos materiales y nuevas formas de producción industrial, y la

automatización y robotización generalizadas tendrán implicaciones energéticas aún mayores.

RECUADRO 7.4

Ciclos económicos y energía

El primer auge económico bien documentado (1787-1814) coincide con el desarrollo de la extracción de carbón y la instalación de las primeras máquinas de vapor estacionarias. La segunda ola expansiva (1843-1869) estuvo claramente impulsada por la difusión de máquinas de vapor móviles (ferrocarriles y barcos de vapor) y el progreso de la siderurgia. El tercer ciclo de crecimiento (1898-1924) fue influenciado por el aumento de la generación de electricidad comercial y la rápida sustitución de motores mecánicos por motores eléctricos en las fábricas. Los puntos centrales de todas estas subidas se hallan a unos 55 años de distancia unos de otros. Existen fascinantes análisis de la era post-1945 que confirman la existencia de ciclos de unos cincuenta años en la historia humana (Marchetti, 1986), en particular, su recurrencia en la vida económica y la innovación técnica (Van Duijn, 1983; Vasko, Ayers y Fontvieille, 1990; Allianz, 2010; Bernard *et al*., 2013).

Estos estudios indican que las etapas iniciales de adopción de nuevas energías primarias están significativamente correlacionadas con el inicio de las grandes olas de innovación. La historia de la innovación energética también confirma con fuerza la idea, todavía polémica, de que las depresiones económicas actúan como desencadenantes de la innovación. Los puntos centrales de las tres olas de innovación identificadas por Mensch (1979) coinciden casi perfectamente con los puntos centrales de las depresiones schumpeterianas. La primera ola, que alcanzó su punto álgido en 1828, está claramente vinculada con el despliegue de motores de vapor estacionarios y móviles, la sustitución del coque por carbón y la generación de gas derivado del carbón. La segunda ola, que alcanzó su máximo en 1880, incluye numerosas invenciones revolucionarias: la generación de electricidad, la luz eléctrica, el teléfono, la turbina de vapor, la producción electrolítica de aluminio y el motor de combustión interna. La tercera ola, cuyo centro de gravedad es 1937, incluye la turbina de gas, el motor de reacción, la luz fluorescente, el radar y la energía nuclear.

Las consecuencias económicas del enorme consumo energético mundial también se reflejan en la lista de mayores empresas del mundo (Forbes, 2015). En 2015, cinco de las veinte principales empresas multinacionales no financieras eran compañías petroleras —EXXON, PetroChina, Royal Dutch Shell, Chevron y Sinopec—, y tres eran fabricantes de automóviles y camiones —Toyota, Volkswagen y Daimler—. La intensificación de la producción ha sido posible gracias al suministro fiable de energía asequible y ha favorecido las economías de escala de la concentración industrial. Prácticamente todos los sectores ofrecen buenos ejemplos de este proceso. En 1900 Estados Unidos tenía alrededor de 200 empresas de fabricación de automóviles y Francia más de 600 (Byrn, 1900). En 2000 solo había tres empresas estadounidenses (GM, Ford y Chrysler) y dos francesas (Renault y Citroën-Peugeot). El número de cervecerías británicas pasó de más de 6.000 en 1900 a solo 142 en 1980 (Mark, 1985). Sin embargo, en varias industrias (incluyendo la producción de cerveza en microcervecerías) se ha producido un movimiento inverso desde la década de 1970. Este cambio es atribuible a una combinación de mejor comunicación, entrega más rápida y multiplicación de especificidades de la demanda.

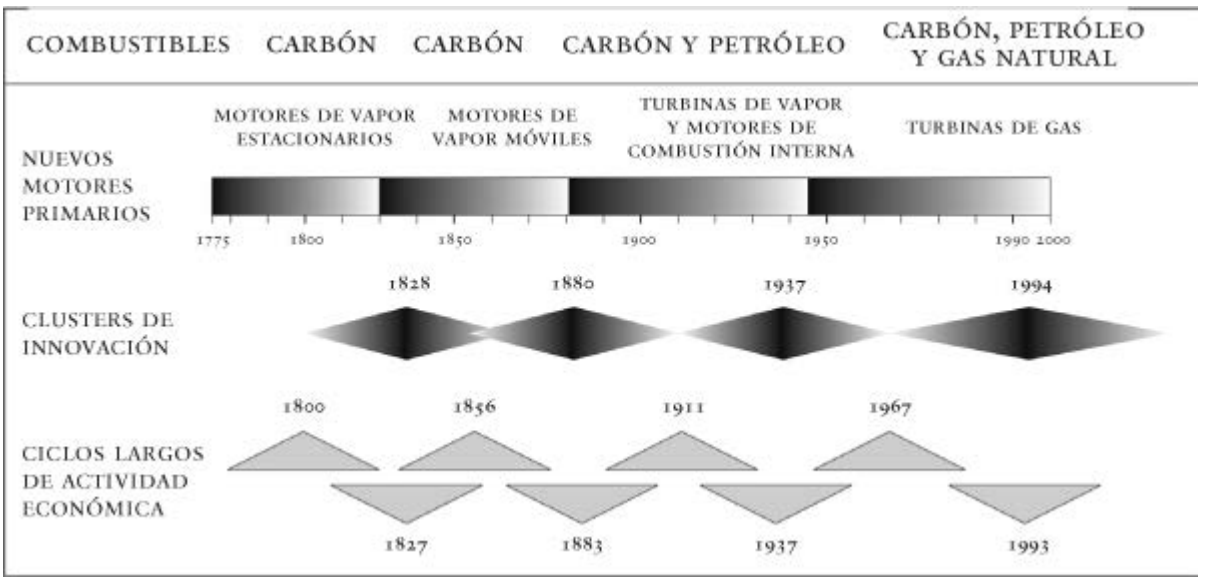


Figura 7.8 Comparación entre el inicio de las principales eras energéticas (identificadas por sus principales combustibles y motores primarios), *clusters* de innovación según Mensch (1979) y ciclos económicos largos en Occidente según Schumpeter (1939). He extendido ambas olas hasta el año 2000.

A nivel individual, la consecuencia más importante de esta era de elevado consumo energético ha sido, con mucho, un grado de prosperidad sin precedentes y la mejora de la calidad de vida. Esto tiene que ver, sobre todo, con un suministro abundante y variado de alimentos. En los países ricos, la gente dispone de media de muchos más alimentos de los que sería necesario. La persistencia de la malnutrición (e incluso el hambre) en medio de esta tendencia (en 2015 45 millones de estadounidenses recibían cupones para alimentos) es una cuestión de desigualdad distributiva. En términos físicos, el aumento de la riqueza se ha manifestado de manera clara con la drástica reducción de la mortalidad infantil y una mayor esperanza de vida. Intelectualmente, se ha reflejado en mayores tasas de alfabetización, más años de escolaridad y un acceso más fácil a una mayor variedad y cantidad de información.

Otro ingrediente importante de esta riqueza ha sido el consumo de energía como medio para ahorrar tiempo. Esto va mucho más allá de la preeminencia generalizada de automóviles privados más intensivos

en energía pero más rápidos que el transporte público. La refrigeración (que evita la compra diaria de alimentos), las cocinas eléctricas y de gas, los microondas y los procesadores de alimentos (que simplifican y aceleran la cocción o el recalentamiento de los alimentos), y la calefacción central (que elimina la necesidad de encender fuego regularmente y abastecerse de combustible) han sido excelentes técnicas de ahorro de tiempo y hoy en día se han adoptado en todo el mundo desarrollado. A su vez, el tiempo que estos usos energéticos permiten ganar se dedica cada vez más a los viajes de ocio y a pasatiempos que a menudo requieren un considerable consumo adicional de energía.

En medio de todos estos procesos de cambio —nuevas fuentes de energía, mejoras del rendimiento y la eficiencia, etc.— hay algo que no ha cambiado: la humanidad no utiliza la energía de un modo progresivamente más racional. El uso del coche privado en la ciudad, que muchos prefieren por ser supuestamente más rápido que el transporte público, es un ejemplo perfecto de consumo irracional de energía. Teniendo en cuenta el tiempo que se requiere para ganar el dinero que cuesta comprar un coche y abastecerlo de combustible, mantenerlo y asegurarlo, a principios de la década de 1970 la velocidad media de los desplazamientos en automóvil en Estados Unidos era inferior a 8 km/h (Illich, 1974). Debido a la congestión del tráfico, a principios de la década de 2000 esta misma velocidad no superaba los 5 km/h, lo cual es comparable con la velocidad de los coches de caballos antes de 1900 o simplemente caminar. Además, con una eficiencia «del pozo a la rueda» (*well-to-wheel*) muy inferior al 10%, los automóviles siguen siendo una de las principales fuentes de contaminación del medio ambiente, y, como ya se ha señalado, también suponen un número considerable de muertes y lesiones (OMS, 2015b).

Los combustibles, la electricidad y convertidores más ligeros, fiables, flexibles y eficientes se utilizan con demasiada frecuencia de manera despilfarradora, causando problemas ambientales y

produciendo una efímera satisfacción personal (o al menos una reclamación de la misma) como única recompensa positiva. Como dijo Rose (1974: 359): «Hasta ahora se han utilizado cantidades cada vez mayores de energía para convertir los recursos en chatarra, actividad de la cual obtenemos beneficios y placeres efímeros; el historial no es demasiado bueno». Pero no hay nada nuevo en el consumo improductivo de energía, y solo podría considerarse un despilfarro si las sociedades humanas trabajaran para alcanzar un único gran objetivo: reducir al mínimo el consumo energético para dedicarlo únicamente a tareas o procesos directamente relacionados con la supervivencia de la especie.

La realidad es que tan pronto como nuestro dominio del mundo físico comenzó a producir modestos excedentes de energía, el ingenio humano los utilizó para crear un mundo artificial de diversidad y (para algunos) ocio, aunque podría haberse utilizado más energía para cubrir las necesidades básicas. Una columna de soporte de peso podría ser un mero cilindro de piedra lisa o un prisma alargado; los tres órdenes de la antigua arquitectura griega (dórico, jónico y corintio) no respondieron a ninguna necesidad estructural o funcional. Una buena cena tampoco era suficiente: los festines romanos tenían que durar días. La búsqueda de distinción, novedad, variedad y diversidad alcanzó un nuevo punto álgido (relativo) durante el Renacimiento y la modernidad temprana (1500-1800), pero incluso en esa época sus mejores demostraciones seguían siendo poco frecuentes y básicamente reservadas al consumo público y la posteridad.

Más aún, es sencillo concluir que los monumentos de las sociedades premodernas no eran meros depósitos desperdiciados de recursos escasos. Norenzayan (2013) ha sostenido que la creencia en deidades juiciosas («grandes dioses») era fundamental para fomentar la cooperación necesaria para construir monumentos y sostener sociedades complejas. Como expresiones materiales de tales creencias, pudieron contribuir a la cohesión social y fomentaron el asombro, el respeto, la humildad, la contemplación y la caridad. En cualquier

caso, a menudo la ambición de la posteridad ha funcionado perfectamente bien, como lo atestigua el número de visitantes que cada año viajan para admirar la basílica de San Pedro, en Roma, o el Taj Mahal, en Agra (figura 7.9). En comparación, ¿no deberíamos aplicar la etiqueta de derroche energético a las extravagantes (y en su mayoría poco inspiradoras) estructuras que construimos para administrar dinero o ver a gladiadores modernos patear una pelota?

Las sociedades modernas han llevado la búsqueda de la variedad, el ocio, el consumo ostentoso y la diferenciación mediante la propiedad a una escala ridícula y sin precedentes. Actualmente hay cientos de millones de personas cuyo gasto discrecional anual en artículos no esenciales (incluida una proporción cada vez mayor de productos de lujo) supera con creces el ingreso medio de una familia occidental de hace un siglo. Los ejemplos extravagantes abundan. El tamaño de las familias en los países ricos sigue reduciéndose, pero el tamaño medio de las casas construidas a medida en Estados Unidos ha superado los 500 m^2; la construcción de yates con plataforma para helicópteros tiene lista de espera; muchos automóviles en el mercado tienen un exceso de potencia tan ridículo que nunca podrá comprobarse en ninguna carretera pública: el motor del Koenigsegg Regera tiene una potencia de 1.316 MW, mientras que un Lamborghini o un Mercedes-Benz de gama alta vienen con «solo» 1.176 MW, siendo este último valor igual a casi 1.600 CV, once veces la potencia del Honda Civic que conduzco.

Figura 7.9 La basílica de San Pedro, terminada en 1626 (Corbis).

De manera más prosaica, decenas de millones de personas toman anualmente vuelos intercontinentales a playas completamente normales para contraer más rápidamente un cáncer de piel; la cohorte cada vez más reducida de aficionados a la música clásica puede escoger entre más de 100 grabaciones de las *Cuatro estaciones* de Vivaldi; existen más de 500 variedades de cereales para el desayuno y más de 700 modelos de automóviles de pasajeros. Esta diversidad excesiva genera un considerable derroche energético, pero parece no tener fin: el acceso electrónico a la selección mundial de bienes de consumo ya ha multiplicado las opciones disponibles de pedido *online*, y la producción personalizada de muchos artículos de consumo (utilizando ajustes individualizados de diseños informáticos y la fabricación aditiva) puede elevar el problema a un nuevo nivel de

exceso. Lo mismo ocurre con la velocidad: ¿realmente necesitamos que un pedazo de basura efímera fabricada en China sea entregado unas pocas horas después de que se haya realizado un pedido en una computadora? Y (próximamente) con ayuda de un dron, ¡nada menos!

Pero independientemente de los indicadores utilizados, este tipo de desperdicio, improductividad y consumo excesivo de energía final sigue siendo una excepción a nivel mundial. Si se observa el suministro medio de energía per cápita, entonces solo unos 40 de los 200 países del mundo han logrado la transición a sociedades industriales maduras, prósperas y sustentadas por un elevado consumo energético (>120 GJ/cápita); y la proporción es aún menor en términos de población: el 18% (1.300 de 7.300 millones en 2015). Si se añaden los hogares ricos de países pobres o en vías de desarrollo, como China, la India, Indonesia y Brasil, la proporción de la población aumentaría solo de manera marginal, hasta el 20%. Por ejemplo, China tiene ahora el cuarto mayor número de familias acomodadas del mundo (tras Estados Unidos, Japón y Reino Unido), pero este número todavía no llegaba a los cinco millones en 2015 (Atsmon y Dixit, 2009; Xie y Jin, 2015).

En consecuencia, la difusión del «milagro occidental» en todo el mundo ha dado lugar a un nivel de desigualdad económica preocupante y sin precedentes entre países. En 2015 el 10% más rico de la humanidad (que vive en 25 países) consumió el 35% de la energía mundial. En términos personales, esto significaba que una semana de consumo energético de un estadounidense equivale al consumo anual de energía primaria de un nigeriano o dos años de suministro anual de energía de un ugandés. Por el contrario, el 5% más pobre de la humanidad (que vive en 15 países africanos) consume menos del 0,2% del suministro de energía comercial primaria del mundo.

Estas disparidades no tienen fácil solución, y reducir la brecha llevará tiempo, incluso en caso de que se dé un crecimiento económico

extraordinariamente rápido: entre 1980 y 2015, durante 35 años de rápida modernización, China casi quintuplicó su consumo de energía per cápita, hasta superar los 90 GJ/cápita. Para ello tuvo que asumir grandes costes medioambientales y de salud, además de tensar el comercio energético mundial, pero sigue estando un 20-25% por debajo de una tasa de suministro confortable. Lo más importante es que, aunque pudiera disponerse fácilmente de todos los recursos necesarios, el impacto medioambiental que supondría llevar el nivel de consumo de energía primaria en todo el mundo al nivel occidental sería inaceptable. La preocupación sobre la integridad de la biosfera —desde la preservación de la biodiversidad hasta el rápido cambio climático antropogénico— ya se ha convertido en una consideración importante a la hora de pensar el futuro de las civilizaciones energívoras.

ENTRE DETERMINISMO Y ELECCIÓN

Muchos acontecimientos históricos son consecuencia de una serie limitada de efectos producidos por un uso concreto de una fuente de energía determinada. El uso de diferentes fuentes de energía primaria deja huellas distintas en el trabajo diario y el ocio. Una vida consumida rompiendo terrones con pesadas azadas, trasplantando plántulas que gotean, agarrando puñados de tallos y cortándolos con una hoz, desgranando la paja para cocinar y machacando el grano a mano (todo ello todavía bastante común en la campiña china de finales del siglo XIX) crea un mundo muy diferente del que emerge cuando grupos de fuertes caballos tiran de vertederas, sembradoras mecánicas y cosechadoras, una arboleda produce abundante madera para grandes estufas y la harina es molida en molinos de vapor (todo ello común a finales del siglo XIX en Estados Unidos).

Del mismo modo, cada motor primario determina un alcance y un ritmo cotidiano diferente. El laborioso uncido de los caballos con

frenos, muserolas, coronas, bridas, atelajes, etc., el estruendo de las herraduras, el traqueteo de los carruajes mal amortiguados, los bozales de animales en reposo atascados en bolsas de alimentación, el barrido del estiércol de caballo de las calles de la ciudad y su transporte para alimentar los jardines de los suburbios… todo ello evoca un ritmo de vida profundamente diferente al de una llave de encendido, el balanceo de los neumáticos radiales, el desplazamiento suave y rápido de las berlinas y los todoterrenos, las redes de estaciones de servicio y la fácil disponibilidad de vegetales y frutas transportados por procesiones de camiones pesados desde California o España (o en contenedores refrigerados y en las bodegas de carga de aviones de pasajeros de otros continentes).

Por eso, utilizar la energía como concepto analítico clave de la historia humana es una elección razonable, eficaz y deseable. No obstante, no debe ser el principal factor explicativo. No debe exagerarse la capacidad explicativa de un enfoque energético de la historia. Afirmaciones imprecisas conducen a conclusiones poco fiables. Afirmar que durante miles de años el incremento de la complejidad socioeconómica ha requerido insumos de energía más elevados y eficientes es decir algo indiscutible. Llegar a la conclusión de que cada mejora de la gestión de los flujos de energía ha traído consigo una mejora de los mecanismos culturales, como hizo Fox (1988), es ignorar numerosas pruebas históricas contradictorias.

La única manera de evaluar la importancia de la energía en la historia de la humanidad de manera útil y reveladora es no sucumbir a las explicaciones simplistas y deterministas apoyadas en innumerables imperativos energéticos, ni menospreciarla reduciéndola a un papel marginal en comparación con otros factores históricos, como los cambios ambientales, las epidemias o las pasiones humanas. La conversión de energía siempre es necesaria para hacer cualquier cosa, pero ninguna conversión extrasomática iniciada y controlada por personas está predestinada, y solo unas pocas surgen simplemente del caos o por accidente. Esta dicotomía es tan importante para

interpretar el pasado como para comprender el futuro, que tampoco está escrito de antemano, pero cuyo rango de posibilidades es evidentemente restringido, muy especialmente por los límites fundamentales que marca la naturaleza de los flujos energéticos.

Imperativos de los requisitos y usos de la energía

El papel crucial de la energía en el mundo físico y el mantenimiento de la vida se refleja necesariamente en los acontecimientos evolutivos e históricos. El desarrollo prehistórico de las sociedades humanas y la creciente complejidad de las altas culturas han estado marcados por innumerables imperativos energéticos. El límite físico más fundamental es, por supuesto, la radiación solar entrante. Este flujo mantiene la temperatura del planeta dentro del rango adecuado para la vida a base de carbono y potencia la circulación atmosférica y el ciclo del agua del planeta. La temperatura, la precipitación y la disponibilidad de nutrientes son los principales determinantes de la productividad de las plantas, pero solo una parte de la biomasa recién sintetizada es digerible. Todo esto dio forma a las modalidades básicas, la densidad de población y la complejidad social de todas las sociedades cazadoras-recolectoras. En la inmensa mayoría de casos, estos grupos tuvieron que ser omnívoros. La mayor parte de su energía alimentaria provino de la abundante recolección de semillas (que combinan almidones con proteínas y aceites) y tubérculos (ricos en carbohidratos).

La abundancia concentrada y la accesibilidad de las plantas importaban más que su biomasa y variedad generales. Los pastizales y los bosques poco densos ofrecían mejores oportunidades que los bosques más densos. La matanza de grandes mamíferos (carnosos y grasos) generó un elevado retorno energético neto, mientras que la caza de especies pequeñas fue casi siempre una actividad energéticamente menos interesante que la recolección de plantas. Los lípidos eran los nutrientes más deseables, pero escaseaban. Su alta densidad energética proporcionaba una satisfactoria sensación de

saciedad. Estos imperativos energéticos definieron las estrategias de recolección y caza y contribuyeron al desarrollo de una mayor complejidad social.

Mientras los músculos humanos (y más tarde los animales) fueron los únicos motores primarios disponibles, la capacidad de trabajo estuvo determinada por imperativos metabólicos: la tasa de digestión de alimentos y pienso, el requisito metabólico basal y de crecimiento de los cuerpos homeotérmicos y la eficiencia mecánica de los músculos. La producción energética sostenida de un humano adulto no puede superar los 100 W. La eficiencia de la conversión de alimentos en energía mecánica no puede superar el 20-25%. Solo un conjunto de personas o animales de tiro podía superar estos límites y, como atestiguan los monumentos antiguos y prehistóricos, esta hazaña, que requería un control eficaz y coordinado, fue realizada repetidamente por sociedades tan diferentes como los constructores de menhires de Irlanda y Bretaña, los egipcios de las primeras dinastías y una pequeña población de la isla de Pascua.

La violencia generada por músculos humanos funcionaba, o bien en el combate cuerpo a cuerpo, o bien en un ataque lanzado sigilosamente desde no más de doscientos metros. Durante miles de años, se mataba de cerca. La anatomía humana imposibilita que un arquero ejerza la máxima fuerza cuando un brazo extendido y otro flexionado están separados por más de 70 cm. Esto limita la tensión y, por tanto, el alcance de la flecha. Las catapultas, tensadas por muchas manos, permitieron aumentar la masa de los proyectiles, pero no el alcance del ataque. Al final, tenía que sobrevenir el combate cara a cara, cuyo resultado dependía en buena medida de la habilidad, la experiencia y la suerte de cada cual.

El paso de la caza-recolección a la agricultura fue impulsado por una combinación de factores energéticos (principalmente nutricionales) y sociales. La posterior intensificación de la agricultura sedentaria, en cambio, fue un claro imperativo energético (Boserup, 1965, 1976). Cuando una forma de producción de alimentos se

aproxima a su rendimiento físico límite, la población puede estabilizar su tamaño (mediante el control de natalidad o la emigración) o adoptar un sistema más productivo de producción de alimentos. El inicio y la duración de las sucesivas etapas de intensificación han variado enormemente en todo el mundo, pero para aprovechar mejor el potencial fotosintético de cada emplazamiento, cada avance exige mayores aportes de energía. En contrapartida, mejores cosechas podían dar de comer a poblaciones cada vez más densas.

La intensificación de la agricultura también requirió una mayor inversión energética indirecta en la cría y alimentación de animales de tiro, la fabricación, el trueque o la compra de herramientas y aperos cada vez más complejos y grandes proyectos de infraestructura, como el aterrazamiento y la construcción de canales de irrigación, embalses, graneros y carreteras. A su vez, esta intensificación condujo a una creciente dependencia de fuentes de energía distintas de los propios humanos. Arar un suelo muy pesado es entre agotador y totalmente imposible sin animales de tiro. La molienda manual de granos es tan intensiva en mano de obra que los animales —y más tarde también la energía hidráulica y eólica— fueron necesarios para procesar cosechas concentradas. La entrega de grano a larga distancia a las ciudades dependía en buena medida de la energía animal y, en ocasiones, del viento. La fabricación de herramientas y utensilios de hierro más duraderos y eficientes consumieron carbón para fundir los minerales.

El mundo de la agricultura tradicional estuvo marcado por imperativos energéticos particulares. Allí donde no se disponía de tierras de pastoreo extensas y donde la tierra cultivable debía utilizarse para cultivar alimentos, el requisito energético del ser humano fijaba los límites de la producción de pienso y, por tanto, el número de animales de tiro de gran tamaño. En los demás casos (excepto en América y Australia), se utilizaron cada vez más animales de tiro, que a menudo se alimentaban casi exclusivamente de pasto y residuos de cultivo. A medida que la disponibilidad de cereales per cápita aumentó, pudo reservarse suficiente tierra cultivable como para

producir alimento para animales de mejor calidad: en Estados Unidos, acabó ocupando el 25% de toda la tierra agrícola, mientras que en las tierras bajas densamente pobladas de Asia tradicional solía ser inferior al 5%.

La intensidad del cultivo (la densidad energética de la producción de alimentos) también tuvo su impacto. En la agricultura intensiva de inundación (en terrenos inclinados y aterrazados) que producía arroz en Asia, apenas había espacio para los grandes animales de pastoreo, y los búfalos de agua solían alimentarse de pasto a las orillas de los arroyos o incluso de plantas acuáticas sumergidas. En cambio, la presencia de grandes cantidades de ganado vacuno, caballos y otros animales domésticos en las regiones con más tierra disponible de Europa (y en América del Norte en el siglo XIX) influyó tanto en la densidad de la población rural como en la organización de los asentamientos. Había que dedicar mucho espacio a los graneros y establos y el almacenamiento del estiércol antes de que se reciclara en el campo.

Los dos agroecosistemas que encarnan estos extremos han sido el cultivo múltiple tradicional dominado por el arroz en China, al sur del Yangtsé, y la agricultura mixta de Europa occidental, muy dependiente de los animales tanto para la alimentación (lácteos y carne) como para el trabajo de campo. Las agriculturas precolombinas fueron moldeadas por otros imperativos energéticos. En igualdad de condiciones, el maíz, un cultivo C4, rinde más que otros cereales de tierra seca (trigo, cebada, centeno, todos ellos cultivos C3), ventaja que aumenta aún más cuando el maíz se intercala con alguna leguminosa: el maíz y el frijol fueron alimentos básicos de la agricultura precolombina en toda América, con excepción de las regiones andinas de gran altitud, donde predominaron la patata y la quinoa. Además, la ausencia de animales domésticos en América dejaba energía y tiempo para otras actividades.

Los imperativos energéticos que definieron las actividades y estructuras no agrícolas de las sociedades tradicionales van desde los

límites geográficos (la ubicación) hasta el desafío de la gestión eficaz. La fundición y forja de metales a mayor escala solo fue posible utilizando energía hidráulica y restringiendo la ubicación de los hornos y las fraguas a zonas montañosas, incluso cuando el transporte de mineral y carbón vegetal era barato. En realidad, la potencia de los animales de tiro y la mala calidad de las carreteras limitaban sobremanera el alcance del transporte terrestre rentable de materiales voluminosos; se preferían las vías de agua y se construían canales. La ineficiencia del carbón vegetal (<20% de la energía de la madera convertida en combustible no fumígeno) causó una extensa deforestación.

La administración de territorios lejanos y la actividad comercial y militar se vieron dificultadas por la lentitud y la poca fiabilidad de los desplazamientos por mar y tierra. La navegación de Roma a Egipto, el mayor productor excedentario de grano del Imperio, podía durar entre una y doce semanas o incluso más (Duncan-Jones, 1990). El fracaso de la Armada Invencible en 1588 puede atribuirse en buena medida al viento; tanto a la falta de viento como al viento desfavorable (Martin y Parker, 1988). E incluso en 1800 barcos ingleses tuvieron que esperar, a veces durante semanas, a que el viento adecuado los llevara a la bahía de Plymouth Sound (Chatterton, 1926).

Los imperativos energéticos tuvieron una profunda influencia en las fortunas nacionales y regionales durante las transiciones energéticas modernas. Los países y localidades con un acceso relativamente fácil a combustibles que podían producirse y distribuirse con menos energía que la fuente de energía anteriormente dominante disfrutaron de un crecimiento económico más rápido, mayor prosperidad y mejor calidad de vida. El primer ejemplo nacional de este tipo de ventaja lo constituyen Holanda y la turba, que marcó el comienzo de la Edad de Oro de la república neerlandesa durante el siglo XVII. Aunque Unger (1984) cuestiona las estimaciones de De Zeeuw (1978) sobre la elevada extracción anual de turba, no hay

duda de que en esa época constituyó la fuente más importante de energía primaria del país. Pocas generaciones más tarde se dio una situación todavía más ventajosa en Reino Unido, que sustituyó casi por completo la madera y el carbón vegetal por carbón bituminoso y coque (King, 2011). A su vez, después de 1870 esta experiencia fue superada con creces por el auge de la economía estadounidense, alimentada inicialmente por excelentes carbones y más tarde por hidrocarburos.

No hay duda de que el sucesivo liderazgo económico y la influencia internacional de la República Holandesa, Reino Unido y Estados Unidos han estado estrechamente vinculados con su temprana explotación de combustibles con un menor requisito de inversión por unidad de energía útil (es decir, con un mayor rendimiento energético neto). El predominio de los combustibles fósiles y la electricidad ha creado un grado de uniformidad técnica sin precedentes y, por extensión gradual, también económica y social (figura 7.10). La lista (incluso básica) de infraestructuras típicas de una civilización energívora moderna es muy larga: minas de carbón, yacimientos de petróleo y gas, centrales térmicas, presas hidroeléctricas, redes de oleoductos y gasoductos, puertos, refinerías, altos hornos de hierro, acerías, fundiciones de aluminio, fábricas de fertilizantes, innumerables empresas químicas, manufactureras y de procesamiento, ferrocarriles, autopistas de varios carriles, aeropuertos, ciudades dominadas por rascacielos y extensos suburbios residenciales.

Como realizan las mismas funciones, su apariencia exterior debe ser idéntica o muy parecida, y la construcción y gestión de muchos de sus componentes ha provenido de un número cada vez más pequeño de empresas que suministran al mercado mundial máquinas, procesos y conocimiento técnico fundamentales. Las dos consecuencias más preocupantes de la dependencia de los grandes flujos de energía son la restricción de la elección (es decir, la imposibilidad de abandonar las prácticas existentes sin causar numerosas dislocaciones masivas) y la degradación del medio ambiente. El mejor ejemplo del primer

fenómeno quizá sea la imposibilidad de eliminar el subsidio energético de la agricultura moderna sin causar una profunda transformación de toda la sociedad.

Figura 7.10 La megalópolis más grande de Brasil, São Paulo, fotografiada en 2013. Las megalópolis son los principales ejemplos de uniformidad global impuesta por elevados niveles de consumo de combustible y electricidad (Corbis).

Por ejemplo, sustituir la actual maquinaria de campo estadounidense por animales de tiro requeriría al menos diez veces más caballos y mulas de los que había a principios del siglo XX. Se necesitarían 300 Mha —el doble de la superficie total de tierra cultivable de Estados Unidos— solo para alimentar a los animales, y cantidades ingentes de urbanitas tendrían que abandonar las ciudades para dedicarse a la agricultura. Los países ricos no son los únicos que no pueden volver a la agricultura tradicional sin adaptar la sociedad a la imagen de la era preindustrial: China es el país con los mayores niveles de fertilización e irrigación del mundo y, por ende, su

dependencia respecto a las energías fósiles para la producción de alimentos es aún mayor.

La restricción de la elección es un resultado paradójico de un mundo dominado por lo que Jacques Ellul (1912-1994) denominó, de manera simple y global, la *technique*, «la totalidad de los métodos concebidos racionalmente y que tienen una eficiencia absoluta (para una determinada etapa de desarrollo) en todos los campos de la actividad humana» (Ellul, 1954: XXV). El mundo actual nos proporciona beneficios sin precedentes y libertades casi mágicas, pero, a cambio, las sociedades modernas no solo deben adaptarse a él, sino someterse a sus reglas y restricciones. Cada persona depende ahora de estas técnicas, pero ningún individuo las entiende en su totalidad; nos limitamos a seguir su dictado en la vida cotidiana.

Las consecuencias van más allá de la obediencia ignorante, pues el poder de difusión de la técnica ha hecho que gran parte de la humanidad sea irrelevante para los procesos de producción, de tal manera que ahora solo se requiere una pequeña parte de la fuerza de trabajo (con cada vez mayor ayuda de los ordenadores) para diseñar y producir artículos de consumo masivo a nivel mundial. Como resultado, ahora la venta de un producto emplea a mucha más gente que el diseño, la mejora continua y la fabricación. Si se clasifican por tamaño de su fuerza de trabajo, en 1960 11 de las 15 compañías más grandes de Estados Unidos (lideradas por GM, Ford, GE y United States Steel) eran productores de bienes que empleaban a más de 2,1 millones de trabajadores; en 2010 solo quedaban dos fabricantes de bienes, HP y GE, con 600.000 empleados, y ahora el top 15 está dominado por minoristas y empresas proveedoras de servicios (Walmart, UPS, McDonald's, Yum, Target).

El siguiente paso lógico es entender esta realidad como parte del proceso que conduce al eventual desplazamiento de la vida basada en el carbono por las máquinas (Wesley, 1974). El paralelismo evolutivo entre las dos entidades es inquietante. Las máquinas están vivas termodinámicamente y su desarrollo se ajusta a la selección natural:

las que fallan no se reproducen, proliferan nuevas especies y tienden hacia la máxima masa posible; las sucesivas generaciones también son progresivamente más eficientes (¡recordemos el impresionante descenso progresivo de la relación masa/potencia!) y móviles y tienen una mayor esperanza de vida. Este paralelismo puede descartarse de un plumazo como una mera biomorfización inquietante, pero el ascenso de las máquinas es un hecho innegable.

Ya se han reemplazado enormes áreas de ecosistemas naturales por infraestructuras necesarias para su fabricación, movimiento y almacenamiento (minas, ferrocarriles, carreteras, fábricas, plazas de estacionamiento); el ser humano dedica cada vez más tiempo a servirlas; sus desechos han causado una extensa degradación de los suelos, las aguas y la atmósfera; y la masa global de los automóviles del planeta ya es mucho mayor que la de la humanidad. La finitud de las reservas de combustibles fósiles no detendrá el ascenso de las máquinas. A corto plazo pueden adaptarse siendo más eficientes; a largo plazo pueden emplear corrientes renovables.

En cualquier caso, solo una interpretación profundamente equivocada de las pruebas geológicas disponibles permitiría pensar que el creciente consumo de combustibles fósiles conduzca a su rápido agotamiento. Las reservas de combustibles fósiles son esa pequeña fracción de la base de recursos cuya distribución espacial y coste de recuperación (a precios actuales y con las técnicas existentes) se conoce con suficiente detalle como para justificar su explotación comercial. A medida que recuperamos una proporción cada vez mayor de los recursos originalmente disponibles, la mejor medida de su disponibilidad es el coste de producción de una unidad marginal de mineral. Este enfoque tiene en cuenta las mejoras en nuestras técnicas de explotación y nuestra capacidad para pagar el precio de recuperación. El impresionante aumento desde 2005 de la recuperación de petróleo de los abundantes yacimientos de esquisto de Estados Unidos —que depende de una combinación de perforación horizontal y fractura hidráulica (Smil, 2015a) y ha hecho que el país

sea el mayor productor mundial de petróleo y gas una vez más— ilustra las enormes oportunidades que aún no se han explotado plenamente.

Por tanto, el agotamiento de los recursos no es una cuestión de agotamiento físico real, sino más bien la carga que puede suponer un aumento del coste que, en última instancia, resulte insoportable. Dejando de lado algunas excepciones notables (como el rápido abandono holandés de la minería del carbón tras el descubrimiento del yacimiento de gas natural supergigante de Groninga), nunca se dan finales repentinos, sino prolongados declives, salidas lentas y cambios graduales hacia nuevas oportunidades de suministro (la minería de carbón en Reino Unido ilustra este proceso a la perfección). Entender este hecho es fundamental para evaluar el auge y las perspectivas de la civilización fósil. El hecho de que los recursos de combustibles fósiles sean finitos no implica que haya una fecha fija para el agotamiento físico del carbón o los hidrocarburos, ni significa el inicio temprano de un aumento insoportable del coste real de la recuperación de esos recursos y, por tanto, la necesidad de una rápida transición a una era sin combustibles fósiles.

Las estimaciones de reservas y evaluaciones de los recursos no bastan para especular sobre el futuro de los combustibles fósiles. La demanda mundial y la eficiencia del consumo no son menos importantes: la demanda (impulsada por la combinación de crecimiento económico y crecimiento demográfico) puede aumentar de manera previsible, pero también es muy variable, y la eficiencia de la conversión de energía, incluso después de generaciones de progreso, sigue siendo muy mejorable. Por consiguiente, la preocupación más importante resultante de la dependencia mundial del carbón y los hidrocarburos, tanto a corto como a largo plazo, no es el agotamiento temprano de los combustibles fósiles —vaticinado muy especialmente por los defensores de un inminente pico petrolífero (Deffeyes, 2001) —, sino más bien el impacto en la habitabilidad de la biosfera (sobre todo debido al cambio climático mundial).

La importancia de los mecanismos de control

La adopción de nuevas fuentes de energía y nuevos motores primarios en el pasado no habría tenido nunca consecuencias tan importantes sin la introducción y el perfeccionamiento de nuevos métodos para aprovechar dicha energía y controlar su conversión para suministrar servicios energéticos (calor, luz, movimiento) al precio adecuado. Estos mecanismos de control (o catalizadores) pueden abrir puertas previamente cerradas y liberar nuevos flujos de energía (o aumentar la tasa de trabajo general de los procesos establecidos, o hacerla más fiable o eficiente). Puede tratarse de meros dispositivos mecánicos (ruedas hidráulicas) o de máquinas sofisticadas que en sí mismas requieren un considerable consumo energético (los microprocesadores de los automóviles actuales son un excelente ejemplo de esta última categoría). O pueden ser simplemente mejores procesos de gestión, mercados emergentes o decisiones políticas o económicas fundamentales.

Independientemente de lo fuerte y capaz que sea, un caballo solamente se convierte en un motor primario eficaz cuando se le introduce un bocado en la boca conectado a las riendas que el jinete lleva en la mano; ese mismo caballo solo puede tirar de un carro de batalla con un buen arnés ligero; solo puede usarse en combate con armadura cuando está ensillado y provisto de estribos; solo puede funcionar como caballo de tiro pesado cuando está calzado con herraduras y equipado con un cómodo collar; y solo puede formar parte de un equipo eficiente cuando el tiro desigual de cada animal (de diferente tamaño) es igualado por la guarnición de varas (*swingletrees*).

La ausencia de un mecanismo de control adecuado puede estropear la eficacia de motores primarios por lo demás admirables. A veces la solución ha tardado mucho tiempo en llegar. Tal vez la mejor ilustración de este fracaso sea la incapacidad de determinar la longitud (geográfica) correcta. A principios del siglo XVIII, los mejores barcos de vela eran eficientes convertidores de energía eólica y potentes

herramientas para la construcción de imperios en Europa. Pero sus capitanes aún no podían encontrar su localización geográfica longitudinal fácilmente. Como explica una petición realizada por los capitanes y mercaderes ingleses al Parlamento en 1714, muchísimos barcos se retrasaban y muchos se perdían. Como la rotación de la Tierra es de 460 m/s en el ecuador, para que una nave determine su longitud con un error de menos de 2 km después de un viaje de 2-3 meses necesita un cronómetro que no pierda más de una fracción de segundo por semana. En 1714 una ley del Parlamento británico ofreció 20.000 libras por tal logro. Finalmente, la recompensa fue a parar a John Harrison (1693-1776) en 1773 (Sobel, 1995).

En lo que respecta a los combustibles, la historia habría tomado un rumbo diferente si el carbón se hubiera utilizado simplemente como sustituto de la madera en chimeneas abiertas, o si el uso del petróleo se hubiera limitado al queroseno de alumbrado. En muchos casos lo que ha marcado la diferencia a largo plazo no ha sido el acceso a recursos energéticos abundantes o determinados motores primarios. Los factores decisivos han sido más bien la innovación, la búsqueda de nuevos usos y el compromiso de desplegar y perfeccionar nuevos recursos y técnicas. La combinación de estos factores ha determinado la eficiencia energética de economías enteras y procesos particulares, así como la seguridad y aceptabilidad de las nuevas técnicas de conversión. Existen ejemplos en este ámbito en todas las eras energéticas y para todos los combustibles y motores primarios.

En un sentido técnico estricto, la clase más importante de controles son los dispositivos y sistemas de retroalimentación (Doyle, Francis y Tannenbaum, 1990; Åström y Murray, 2009). Transfieren la información sobre un proceso concreto al mecanismo de control, que puede entonces ajustar la operación. La Europa de la modernidad temprana adquirió un liderazgo decisivo en el desarrollo de estos sistemas de retroalimentación. Las primeras aplicaciones incluyeron termostatos (utilizados por primera vez alrededor de 1620 por un ingeniero holandés, Cornelis Drebbel), el ajuste automático de los

molinos de viento con abanicos de aspas (patentado en 1745 por un herrero inglés, Edmund Lee), flotadores en cisternas domésticas y calderas de vapor (1746-1758), y el famoso gobernador centrífugo de James Watt, que regulaba la potencia de las máquinas de vapor (1789). El mecanismo de control más habitual hoy en día son los microprocesadores que controlan el funcionamiento de los motores de automóviles y aviones.

Un mecanismo de control indispensable son las instrucciones que permiten duplicar procesos de producción y gestión y obtener bienes y servicios estandarizados. El rápido desarrollo de la imprenta en la Europa moderna temprana supuso una contribución de primer orden en este campo. En 1500 se habían fabricado más de 15 millones de ejemplares de más de 40.000 libros o ediciones diferentes en Europa occidental (Johnson, 1973). La introducción del grabado en cobre durante el siglo XVI y el desarrollo contemporáneo de varias proyecciones de mapas también fueron avances notables. Otra innovación destacada en este ámbito fue el lector de tarjetas perforadas, inventado por Joseph Marie Jacquard (1752-1834) en 1801 para controlar operaciones en telares. Antes de 1900 se empleaban tarjetas perforadas en las máquinas de Herman Hollerith (1860-1929), utilizadas para procesar los datos del censo (Lubar, 1992). Después de 1940, las entradas perforadas controlaron primero los ordenadores electromecánicos y luego electrónicos, todo ello sustituido finalmente por el almacenamiento electrónico de datos.

Hasta finales del siglo XIX los mecanismos de control fueron básicamente mecánicos. Durante el siglo XX, el avance de las matemáticas y la física aplicadas, sobre todo la invención y el uso generalizado de transistores, circuitos integrados y microprocesadores, crearon un nuevo y vasto campo de control automático cada vez más sofisticado mediante el uso de dispositivos eléctricos y electrónicos. Las innovaciones más importantes incluyeron desde el despliegue generalizado de radares (para el control de incendios, la guía de misiles, el bombardeo de localizaciones específicas y la navegación en

piloto automático) hasta miríadas de mecanismos de control basados en microchips en informática, electrónica de consumo y procesos industriales.

En un sentido más amplio, desde luego la consideración más básica que puede hacerse respecto de los dispositivos de control tiene que ver con qué deciden hacer las sociedades con las fuentes de energía y los motores primarios de que disponen. ¿Qué reparto establecen entre usos productivos y consumo personal discrecional? ¿Qué equilibrio —si es que lo hay— buscan entre autarquía y dependencia del comercio exterior? ¿Cuán abiertas se muestran a las nuevas ideas y los nuevos bienes de consumo? ¿Qué presupuesto dedican al gasto militar? ¿Cuánto control centralizado desean ejercer? En todos estos aspectos, las restricciones, los impulsos y las tendencias culturales, religiosas, ideológicas y políticas son evidentemente decisivas. De nuevo, existen buenos ejemplos numéricos en cualquier era energética. Dos contrastes trascendentales son especialmente reveladores: el primero entre los viajes náuticos de descubrimiento en Occidente y China; el otro entre los enfoques de modernización económica en Rusia y Japón.

Los viajes transoceánicos requerían no solo velas capaces de acercar el barco al viento (*taking the ship closer into the wind*), sino también cascos más fuertes, buenos timones de popa y dispositivos de navegación fiables. Los chinos inventaron casi todas estas cosas y las combinaron en sus grandes flotas Ming. Un siglo después del regreso de Marco Polo de China, estas flotas habían llegado más al oeste de China de lo que cualquier flota europea hacia el este en ese momento. Entre 1405 y 1433 navegaron regularmente por el sudeste asiático y el océano Índico y visitaron la costa de África oriental (Needham *et al*., 1971). Luego una repentina involución del Imperio (muy centralizado) imposibilitó la navegación.

En contraste, aunque inicialmente los barcos europeos de la Baja Edad Media eran motores primarios claramente peores, la empresa de exploración fue sostenida por una combinación de actitud inquisitiva, celosa y agresiva de los gobernantes y navegantes españoles y

portugueses. En el siglo XVII, las empresas mercantiles inglesas y holandesas se habían hecho prominentes: la East India Company se estableció en Londres en 1600 y la Vereenigde Oost-Indische Compagnie (VOC) holandesa se constituyó en 1602 (Keay, 2010; Gaastra, 2007). Entre 1602 y 1796 los barcos de la VOC hicieron 4.800 viajes a las Indias Orientales, y la Compañía de las Indias Orientales gobernó grandes partes del subcontinente entre 1757 y 1858. Esta amalgama de aspiraciones económicas, religiosas y políticas dio como resultado la eventual dominación europea de los mares y el establecimiento de extensos imperios.

La comparación de la riqueza económica de Rusia y Japón después de 1945 contrasta la cantidad con la calidad, la autarquía con el comercio y el papel del Estado como único árbitro con el Estado como principal catalizador de la modernización. Los escasos recursos de carbón de Japón, su limitado potencial hidroeléctrico y la práctica ausencia de hidrocarburos le obligaron a ser un importante importador de energía y, a fin de reducir su vulnerabilidad al elevado precio del combustible y la interrupción de las importaciones, se convirtió en uno de los consumidores de energía más eficientes del mundo (Nagata, 2014). La burocracia que ha gobernado el país ha promovido la cooperación del Estado con la industria, la innovación técnica y las exportaciones de alto valor añadido.

En cambio, gracias a su impresionante patrimonio mineral en su región europea, Siberia y Asia Central, la Unión Soviética se convirtió no solo en autosuficiente respecto de todas las fuentes de energía, sino también en un importante exportador de combustible. Pero varias generaciones de rígida planificación central, los planes quinquenales estalinistas centrados en la autarquía (que continuaron mucho después de la muerte del dictador) y la excesiva militarización de la economía convirtieron al país en el consumidor de energía menos eficiente del mundo industrializado: durante los años previos al colapso, la URSS fue con mucho el mayor productor mundial de petróleo (extraía 1,66 veces más que Arabia Saudita) y gas natural (1,5 veces más que

Estados Unidos), pero su PIB per cápita era solo del 10% del estadounidense (Kushnirs, 2015).

Determinados controles clave de flujos críticos de energía a menudo han permanecido más allá de la influencia humana o han sido usurpados (o al menos fuertemente condicionados) por desviaciones parasitarias. McNeill (1980) conceptualizó esta teoría en su doble tratamiento del microparasitismo y macroparasitismo. Microparásitos —bacterias, hongos, insectos— previenen el esfuerzo humano para asegurar suficiente energía alimentaria. Dañan o destruyen los cultivos y animales domésticos o impiden el uso eficiente de nutrientes digeridos al invadir directamente el cuerpo humano, de tal manera que las sociedades modernas han dedicado mucha energía a limitar su propagación en el campo y entre la población recurriendo, sobre todo, a pesticidas y antibióticos.

El macroparasitismo ha asumido una variedad de mecanismos de control social de los flujos de energía que se basan tanto en la coerción —que va desde la esclavitud y la servidumbre hasta la conquista militar— como en la compleja (y en parte voluntaria) relación entre grupos desiguales de personas. Sin duda, los grupos de interés de diversa índole se han convertido en los macroparásitos más importantes de los países modernos y ricos: desde asociaciones profesionales y sindicatos hasta cárteles industriales oligopólicos y grupos de presión. Al conformar (y a menudo vetar o inhabilitar) la política de los gobiernos y fijar los precios, estos grupos trabajan en contra de la optimización del consumo de recursos, e inevitablemente tienen un efecto notable en el desarrollo de los recursos energéticos y la eficiencia de su uso. Estos grupos están detrás de los fuertes subsidios que durante décadas se han otorgado a los productores de diversos combustibles fósiles y electricidad nuclear, y ahora están detrás de los nuevos subsidios que favorecen la construcción de turbinas solares fotovoltaicas y eólicas (véase recuadro 7.3).

Olson (1982) llamó acertadamente a estas agrupaciones «coaliciones distributivas» y señaló que las sociedades estables irán

adquiriendo gradualmente un mayor número de alianzas de este tipo. La aceptación de este argumento ayuda a explicar el declive industrial británico y estadounidense, así como el éxito posterior a la Segunda Guerra Mundial de Alemania y Japón. Las organizaciones creadas por las potencias vencedoras después de 1945 en las dos naciones derrotadas eran mucho más inclusivas y su rendimiento energético refuerza este punto de vista: las economías japonesa y alemana son claramente menos intensivas en energía que la británica y estadounidense. Esto es cierto no solo en conjunto, sino también en prácticamente todas las comparaciones sectoriales importantes.

Por otro lado, la acción de determinados grupos sociales ha abierto «puertas energéticas» y mejorado las eficiencias de conversión. Las aptitudes de los emigrantes británicos del siglo XIX eran superiores a la proporción de emigrantes en la población nativa. Obviamente, su llegada a Estados Unidos fue un importante catalizador del crecimiento de los flujos y el ahorro de energía (Adams, 1982). Desde la década de 1990 se produce un proceso similar con la inmigración a gran escala de ingenieros indios a empresas de electrónica en general y a Silicon Valley en particular (Bapat, 2012). Y al estar obligadas a competir a nivel mundial, las empresas multinacionales se esfuerzan por reducir la intensidad energética de su producción, difundiendo así nuevas técnicas y una mayor eficiencia en la conversión de energía en todo el mundo.

Los límites de las explicaciones energéticas

La mayoría de historiadores no han usado la energía como una variable explicativa esencial. Incluso Fernand Braudel (1902-1985), conocido por su insistencia en la importancia de los factores materiales y económicos, no menciona ningún tipo de energía en su larga definición de civilización:

> Una civilización es ante todo un espacio, un «área cultural», como dirían los antropólogos, un *locus*. Dentro del *locus* [...] debes

> imaginar una gran variedad de «bienes» y características culturales: desde la forma de sus casas, los materiales con los que están construidas y su techo hasta habilidades como las flechas de plumas, un dialecto o grupo de dialectos, el gusto culinario, una tecnología en particular, una estructura de creencias, una forma de hacer el amor e incluso la brújula, el papel y la imprenta. (Braudel, 1982: 202)

¡Como si los materiales, las casas, las flechas y las imprentas se produjeran *ex nihilo*, sin ningún consumo energético! Si queremos comprender los grandes factores explicativos de la historia, esta omisión es indefendible. Pero es justificable si constatamos que las fuentes de energía, los motores primarios y los niveles de consumo energético no determinan las aspiraciones y los logros de las sociedades humanas. Y existen innegables razones naturales para que esto sea así. La conversión de energía es absolutamente esencial para la supervivencia y evolución de los organismos, pero su modificación y su uso específico están regidos por propiedades intrínsecas a los organismos.

Por muy fundamentales que sean las leyes de la termodinámica, la energía no es el único determinante de la evolución de la biosfera, la vida en general y las acciones humanas en particular: la evolución es inevitablemente entrópica, pero hay entrantes que no pueden ser ni sustituidos ni reciclados. La Tierra, bañada por la radiación solar, no podría albergar vida basada en el carbono sin una adecuada disponibilidad de elementos indispensables para las conversiones bioquímicas, como el fósforo en el ATP, el nitrógeno y el azufre en las proteínas, el cobalto y el molibdeno en las enzimas, el silicio en los tallos de las plantas o el calcio en las conchas y huesos de los animales. La información epigenética canaliza la energía hacia el mantenimiento, el crecimiento y la diferenciación y la reproducción; estas transformaciones irreversibles disipan tanto la materia como la energía y se ven afectadas por la disponibilidad de tierra, agua y

nutrientes y la necesidad de hacer frente a la comunicación y depredación entre especies.

Los flujos de energía limitan la organización de la biosfera, pero no la determinan en ninguna escala. Como dicen Brooks y Wiley (1986: 37-38),

> Los flujos de energía no proporcionan una explicación satisfactoria de por qué existen organismos, por qué varían los organismos o por qué existen diferentes especies. [...] Son las características intrínsecas de un organismo las que determinan los flujos de energía y no al revés. Si el flujo de energía fuera determinante para los sistemas biológicos, sería imposible que cualquier cosa viva muriera de hambre. [...] Sugerimos que los organismos son sistemas físicos con características individuales determinadas genética y epigenéticamente que utilizan la energía que fluye en el ambiente de manera relativamente estocástica.

Con todo, esta realidad fundamental no justifica que se ignore el papel de la energía en la historia, sino que aboga por reconocer el papel que juega. En las complejas sociedades humanas modernas, el consumo de energía tiene muchísimo más que ver con el deseo y la comodidad que con meras necesidades vitales. La cantidad de energía disponible en una sociedad fija límites claros a lo que puede hacerse en ella de manera general, pero puede no ser útil para entender la ética o el éxito económico de un grupo. Los combustibles y motores primarios dominantes son uno de los factores más importantes de una sociedad, pero no determinan el detalle de su éxito o fracaso. Esto es especialmente evidente cuando se examina la ecuación energía-civilización. Este concepto, tan importante en la sociedad moderna, equipara un elevado consumo energético con un nivel de civilización avanzado: basta con recordar la obra de Ostwald o la conclusión de Fox, según la cual «cada mejora de la gestión de los flujos de energía

ha provocado una mejora de los mecanismos culturales» (Fox, 1988: 166).

La génesis de este vínculo no es sorprendente. Hubiera sido imposible satisfacer deseos materiales tan importantes y a tan gran escala sin un consumo creciente de energía fósil. El avance de la civilización ha sido equiparado a la obtención de más bienes y comodidades. Este enfoque (sesgado) excluye los avances creativos (morales, intelectuales y estéticos), que no tienen una conexión sencilla con ningún nivel o tipo de consumo de energía en particular: no existe una correlación evidente entre tipos y niveles de consumo energético y la «mejora de los mecanismos culturales». Como cualquier otra forma de reduccionismo, el determinismo energético es muy engañoso.

Georgescu-Roegen (1980: 264) sugirió una brillante analogía que resume muy bien la dificultad del análisis histórico de calidad: la geometría restringe el tamaño de las diagonales de un cuadrado, no su color, de tal manera que «que un cuadrado resulte ser "verde", por ejemplo, es una cuestión completamente diferente». Así, el campo de acción y progreso físico de cada sociedad está limitado por imperativos energéticos, pero lo que pueda ocurrir en cada campo —incluso el más pequeño— es una cuestión difícil de prever y explicar. Es fácil reunir pruebas históricas que van en esta dirección, tanto en grandes asuntos como en mundanos.

La formulación de preceptos éticos universales y duraderos por parte de antiguos pensadores y moralistas y fundadores de religiones en Oriente Medio, la India y China se dio en sociedades poco consumidoras de energía, donde la principal preocupación de la mayoría de la población era sobrevivir. El cristianismo y el islam, monoteísmos que aún hoy ejercen una inmensa influencia en el mundo, surgieron respectivamente hace veinte y trece siglos en entornos áridos en los que sociedades agrarias no disponían de medios técnicos para convertir la abundante luz solar en energía útil. Los griegos de la era clásica a menudo se referían a los esclavos en términos que los situaban al mismo nivel que los animales de trabajo

(llamándolos *tetrapoda*, 'cuadrúpedos', en lugar de *andrapoda*,'hombres libres con pies y manos'), pero nos legaron las ideas de libertad individual y democracia. El avance paralelo de la libertad y la esclavitud es uno de los aspectos más notables de la historia griega (Finley, 1959), igual que la reivindicación de la igualdad humana y la esclavitud al comienzo de la república estadounidense.

Estados Unidos adoptó su visionaria constitución («todos los hombres son creados iguales») en una época en la que la principal fuente de energía de la sociedad era la madera y mientras el primer, tercer y cuarto presidentes del país —James Madison (1751-1836), George Washington (1732-1799) y Thomas Jefferson (1743-1826)— eran propietarios de esclavos. La Alemania de finales del siglo XIX abrazó un militarismo agresivo y dos generaciones más tarde el fascismo en el preciso momento en que se convirtió en el principal consumidor de energía de Europa continental, mientras que Italia y España se convirtieron en dictaduras durante las décadas de 1920 y 1930 respectivamente, cuando su consumo de energía per cápita era de los más bajos del continente, con generaciones de retraso respecto al consumo alemán.

La creación artística ha tenido poco que ver con el nivel de consumo energético o un tipo particular de energía utilizada en cada momento: la creación de obras atemporales en el campo de la literatura, la pintura, la escultura, la arquitectura o la música no está vinculada con el consumo de energía medio de una sociedad. Durante la primera década del siglo XVI, un paseante cualquiera en la *piazza della Signoria* de Florencia podría haberse cruzado en cuestión de días con Leonardo da Vinci, Rafael, Miguel Ángel y Botticelli, una concatenación de talento creativo totalmente inexplicable por la combustión de madera y el aprovechamiento de animales de tiro (prácticas comunes en cualquier otra ciudad italiana o de Europa o Asia de la época).

Ningún análisis energético puede explicar tampoco la presencia de Gluck, Haydn y Mozart en una misma sala en la Viena de José II de la década de 1780, o que en la década de 1890, en pleno *fin de siècle* parisino, pudiera leerse la última novela de Émile Zola y luego ver el último lienzo de Claude Monet o Camille Pissarro el mismo día en que Gustave Doret dirigía *Prélude à l'après-midi d'un faune*, de Claude Debussy (figura 7.11). Además, el arte no muestra ningún progreso acorde con las eras energéticas: las pinturas rupestres del periodo neolítico en el sur de Francia, las proporciones de los templos clásicos de Grecia y el sur de Italia, y el sonido de los cantos medievales de los claustros franceses no son menos agradables y cautivantes ni menos modernos que las coloridas composiciones de Joan Miró, las arrolladoras curvas de los edificios de Kenzo Tange o el empuje y la melancolía de la música de Rajmáninov.

Durante el siglo XX, el consumo de energía tampoco tuvo mucho que ver con la libertad personal y política: crecieron en Estados Unidos, país energívoro, igual que en la India, país poco consumidor de energía; se redujeron en la URSS, país energívoro, así como en Pakistán, país poco consumidor de energía. Después de la Segunda Guerra Mundial, la URSS estalinista y postestalinista y algunos países del antiguo imperio soviético consumieron más energía que las democracias de Europa occidental, pero no por ello lograron ofrecer a sus pueblos una calidad de vida comparable, factor clave que condujo a la eventual desaparición del comunismo. Y la actual Arabia Saudita, gran consumidora de energía, tiene un índice de libertad mucho más bajo que la India, poco consumidora de energía (Freedom House, 2015).

Figura 7.11 Camille Pissarro, *Le Boulevard de Montmartre, matinée de printemps*. Óleo sobre lienzo, 1897 (Google Art Project).

Tampoco existe un vínculo fuerte entre el consumo de energía per cápita y el sentimiento subjetivo de satisfacción con la vida o felicidad personal (Diener, Suh y Oishi, 1997; Layard, 2005; Bruni y Porta, 2005). Entre las veinte naciones con mayor índice de satisfacción se encuentran no solo Suiza y Suecia, países energívoros, sino también consumidores de energía relativamente modestos como Bután, Costa Rica y Malasia, mientras que Japón (en el 90º lugar) está por detrás de Uzbekistán y Filipinas (White, 2007). Y entre los 25 países mejor clasificados del Informe sobre la felicidad en el mundo de 2015 (Helliwell, Layard y Sachs, 2015) figuran países poco consumidores de energía como México, Brasil, Venezuela y Panamá, todos ellos por delante de Alemania, Francia, Japón y Arabia Saudita.

Por supuesto, la satisfacción de las necesidades vitales y básicas requiere un consumo energético muy moderado, pero las comparaciones internacionales muestran claramente que la calidad de vida aumenta con el aumento del consumo de energía. Las sociedades centradas en el bienestar —en lugar del consumo frívolo— pueden lograr una mayor calidad de vida con una fracción de los combustibles y la electricidad que emplean los países más derrochadores. El contraste entre Japón y Rusia, Costa Rica y México o Israel y Arabia Saudita es evidente en este ámbito. En todos estos casos, la realidad exterior que representan los flujos de energía ha tenido poca importancia en comparación con las decisiones y la motivación internas. Un consumo energético per cápita muy similar (por ejemplo, el de Rusia y Nueva Zelanda) puede producir resultados fundamentalmente diferentes, mientras que niveles de consumo energético muy dispares pueden dar lugar a niveles de calidad de vida física sorprendentemente similares: Corea del Sur e Israel tienen un índice de desarrollo humano casi idéntico, pero el consumo de energía per cápita de Corea es un 80% más alto.

La imagen del espíritu detrás de la fachada de la realidad física es igualmente apropiada cuando se observa la enorme homogeneidad mundial de las estructuras y procesos de alto consumo energético. Los imperativos universales de sus entrantes de energía y materiales y sus necesidades de funcionamiento hacen que los altos hornos del Medio Oeste en Estados Unidos, la cuenca minera del Ruhr en Alemania, la región de Donetsk en Ucrania, la provincia de Hebei de China, la isla de Kyushu en Japón y el estado de Bihar en la India sean casi idénticos exteriormente. Sin embargo, considerados desde una perspectiva global, no son iguales. Sus peculiaridades tienen que ver con el dispositivo cultural, político, social, económico y estratégico en el que se han originado y siguen operando, así como con el destino y la calidad de los productos finales fabricados con el metal que funden.

Otro vínculo fundamental en el que la explicación energética tiene una utilidad limitada es el efecto del suministro energético en el

crecimiento demográfico. Las reconstrucciones demográficas a largo plazo de mayor calidad, en Europa y China, muestran periodos muy largos de crecimiento lento compuesto por sucesivas oleadas de expansiones y crisis causadas por epidemias y guerras (Livi-Bacci, 2000, 2012). La población total europea durante la primera mitad del siglo XVIII era tres veces mayor que al comienzo de la era común; en 1900 había vuelto a (más que) triplicarse. Sin duda, la mejora de la nutrición tuvo que ser un factor explicativo importante, pero la cuidadosa reconstrucción de la ingesta media de energía alimentaria (Livi-Bacci, 1991) muestra que no pudo ser el único (McKeown, 1976).

Y si atribuyéramos el aumento de la población europea después de 1750 a un mayor consumo de energía (traducido en una mejor vivienda, higiene y atención sanitaria), entonces ¿cómo explicar el aumento simultáneo de la población en China durante la dinastía Qing? En 1700 la población china era solo tres veces mayor que durante el pico de la dinastía Han, en 145, pero en 1900 casi igualaba el crecimiento europeo al triplicarse y alcanzar 475 millones de personas. Sin embargo, durante ese periodo no se produjeron grandes transiciones hacia nuevas fuentes de energía o motores primarios, apenas hubo mejoras en el consumo medio per cápita de combustibles de biomasa tradicionales y carbón, y no hubo tampoco un gran aumento en el suministro medio per cápita de alimentos (de hecho, en 1876-1879 se produjo una de las peores hambrunas de la historia de China).

No es sorprendente que las consideraciones energéticas tampoco sean de mucha ayuda para tratar de explicar uno de los mayores enigmas de la historia: el colapso de las sociedades complejas. Las investigaciones sobre este fascinante problema (Tainter, 1988; Ponting, 2007; Diamond, 2011; Faulseit, 2015) solo ofrecen respuestas sencillas cuando sus autores aceptan ignorar incómodas fuentes de complejidad. Una de las explicaciones más notables centradas en la energía tiene que ver con los efectos de la degradación generalizada de

los ecosistemas provocada por métodos de cultivo insostenibles y deforestación excesiva, dando lugar a una reducción de la producción de alimentos. Otras explicaciones comunes son la imposibilidad de gestionar eficazmente grandes imperios por culpa de un transporte terrestre deficiente y el creciente coste en recursos relacionado con la protección de territorios lejanos (el síndrome del sobredimensionamiento imperial).

Sin embargo, como demuestran las decenas de razones diferentes ofrecidas para explicar la caída del Imperio romano —con mucho el «colapso» más estudiado de la historia (Rollins, 1983; Smil, 2010c)—, las explicaciones que favorecen la disfunción social, los conflictos internos, las invasiones, las epidemias o el cambio climático son mucho más comunes. Un hecho indiscutible es que muchos colapsos sociopolíticos se han producido sin que haya ninguna evidencia clara de degradación de la base energética. Ni la lenta desintegración del Imperio romano de Occidente ni la repentina desaparición de Teotihuacán pueden relacionarse con una menor capacidad de producción de alimentos, un cambio notable en los motores primarios dominantes o un cambio drástico en el consumo de combustibles de biomasa. Del mismo modo, muchos hitos y expansiones de gran alcance histórico —incluidos el auge gradual del Imperio Antiguo de Egipto, el surgimiento de la república romana como potencia dominante en Italia, la rápida difusión del islam durante el siglo VII y las invasiones mongolas durante el siglo XIII— no pueden relacionarse con ningún cambio importante en el uso de combustibles y motores primarios.

Los futuros extremos son fáciles de dibujar. Por un lado, es concebible que el conocimiento que posee ahora Occidente se imponga en todo el mundo en sus patrones básicos de comportamiento. La difusión de este conocimiento podría crear una verdadera civilización mundial capaz de vivir respetando los límites de la biosfera y prosperar durante milenios. El argumento directamente opuesto es que la biosfera ya es víctima de acciones humanas que

interfieren en muchos procesos fundamentales de apoyo a la vida e incluso violan los límites planetarios que definen el espacio operativo seguro para la humanidad (Centro de Resistencia de Estocolmo, 2015). Por consiguiente, es igualmente concebible —dejando de lado la posibilidad de una guerra nuclear a gran escala— que una civilización global de alto consumo energético colapse mucho antes de acercarse a su límite de recursos. El vasto espacio entre estos dos extremos puede llenarse con escenarios que van desde el mantenimiento temporal (o incluso la profundización) de la desigualdad mundial hasta el lento pero importante progreso hacia políticas nacionales y mundiales más racionales.

Dejando de lado el eventual impacto de un asteroide, erupciones megavolcánicas o pandemias virales sin precedentes (para su análisis, véase Smil, 2008b), la disipación gradual provocada por la degradación de la biosfera más allá de la habitabilidad sostenible parece más probable que una desaparición repentina similar a la de Teotihuacán. No haré ninguna predicción sobre las posibilidades de disfunción social destructiva, guerra mundial o epidemia, sino que me limitaré a señalar que coexisten dos expectativas contradictorias sobre la base energética de la sociedad moderna: el conservadurismo crónico (¿falta de imaginación?) en relación con el poder de la innovación técnica y el repetido y exagerado optimismo respecto a las nuevas fuentes de energía renovable.

La lista de predicciones técnicas fallidas es larga (Gamarra, 1969; Pogue, 2012). Algunos de los errores más habituales se refieren al desarrollo y el uso de las conversiones de energía (Smil, 2003). Los expertos descartaron inicialmente la viabilidad de la iluminación de gas, el barco de vapor, la bombilla incandescente, el teléfono, el motor de gasolina, el vuelo motorizado, la corriente alterna, la radio, la propulsión de cohetes, los satélites de comunicación de energía nuclear y la computación de masas. En ocasiones este conservadurismo perseveró incluso después de que las innovaciones tuvieran éxito. Los viajes transatlánticos en barco de vapor parecían imposibles porque se

pensaba que los barcos no llevarían suficiente combustible para un viaje tan largo. En 1896 Lord Kelvin se negó a unirse a la Royal Aeronautical Society británica: su nota manuscrita a Baden F. S. Baden-Powell, un entusiasta defensor de la aviación militar, decía que no tenía «ni la más mínima molécula de fe en la navegación aérea más allá de los globos» (Thomson, 1896). En un momento en que decenas de fabricantes ya fabricaban automóviles cada vez más eficientes y fiables, Byrn (1900: 271) dijo que no era «probable que el hombre sea capaz de arreglárselas sin el caballo».

La fuerza de los mitos sobre nuevas formas de energía no es menos sorprendente. Inicialmente suele pensarse que las nuevas formas de energía acarrean pocos problemas, si es que acarrean alguno. Prometen un suministro energético abundante y barato que abre la puerta a un cambio social casi utópico (Basalla, 1982; Smil, 2003, 2010a). Después de milenios de dependencia respecto a los combustibles de biomasa tradicionales, muchos escritores del siglo XIX vieron en el carbón una fuente de energía ideal y en la máquina de vapor un motor primario casi milagroso. La fuerte contaminación del aire, la destrucción de la tierra, los riesgos para la salud, los accidentes mineros y la necesidad de recurrir a reservas de carbón cada vez más pobres o más profundas barrieron el mito muy deprisa. La electricidad fue el siguiente «El Dorado energético»: llegó a pensarse que podía curar la pobreza y la enfermedad (recuadro 7.5).

Si hay algo de lo que podemos estar seguros es que las generaciones venideras necesitarán mucha más energía para extender la vida decente a la mayor parte de una población mundial que sigue creciendo y cuyo acceso a la energía está muy por debajo de los mínimos compatibles con una calidad de vida decente. Esto puede parecer una tarea casi imposible. La civilización mundial que más energía consume ya sufre económica y socialmente debido a su precipitada expansión, y un crecimiento aún mayor amenaza la integridad de la biosfera de la que depende su propia supervivencia (Smil, 2013a; Rockström *et al*., 2009).

Otra gran incertidumbre es la viabilidad a largo plazo de la vida urbana. Es evidente que la cohesión social y el cuidado de la familia, tan característicos de la vida rural, no prevalecen en las ciudades modernas. La tensión de la vida urbana para una población que durante tanto tiempo ha sido rural y cohesionada se manifiesta tanto en los países ricos como en los pobres. Los índices generales de delincuencia pueden haber disminuido en muchos países, pero grandes áreas de muchas de las ciudades mayores del mundo siguen siendo sinónimo de violencia, drogadicción, sinhogarismo, abandono infantil, prostitución y miseria. Y, sin embargo —y quizá más que nunca—, los imperativos de la economía moderna exigen estabilidad social y cooperación eficaz. Las ciudades siempre han crecido y se han renovado con la migración rural, pero ¿qué ocurrirá con la civilización, que ya es mayoritariamente urbana, cuando el mundo rural haya desaparecido casi por completo y la estructura social de las ciudades haya terminado de desintegrarse?

Por suerte, existen señales esperanzadoras. Precisamente porque el consumo de energía bruta no determina el curso de la historia, nuestro tesón y nuestra creatividad pueden contribuir a debilitar —o incluso invertir— el vínculo evolutivo entre el avance de la civilización y el consumo de energía. Nos hemos dado cuenta de que el creciente consumo de energía no puede equipararse con adaptaciones efectivas y que, por tanto, deberíamos ser capaces de romper el dictado de la ley de la máxima transformación de energía de Lotka (1925). Esto debería resultar más fácil gracias a los claros indicios de que disponemos de que maximizar la producción energética es contraproducente.

RECUADRO 7.5

La promesa de la electricidad que nunca acaba

La electricidad es la forma de energía más versátil. Su polifacética promesa inspiró a innovadores (Edison, Westinghouse, Steinmetz, Ford) y políticos de todo el espectro ideológico (Lenin, Roosevelt) por igual. Incluso antes del final de la guerra civil rusa, Lenin (1920: 1) concluyó que el éxito económico «solo podrá asegurarse cuando el Estado proletario ruso controle *de facto* una gran máquina industrial construida con tecnología punta; esto significa electrificación». El «carbón blanco» —la hidroelectricidad— tuvo un atractivo especial entre los tecnócratas occidentales hasta la década de 1950, cuando fue superado por la promesa sin precedentes de la energía nuclear.

En 1954 Lewis L. Strauss (1896-1974), presidente de la Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos (ocupó el cargo entre 1953 y 1958), declaró a la Asociación Nacional de Escritores Científicos en Nueva York:

> Nuestros hijos dispondrán en sus casas de energía eléctrica tan barata que no tendrá sentido medir su flujo. No es exagerado esperar que conozcan las grandes hambrunas periódicas que se dan en distintas regiones del mundo como una mera cuestión de historia, que viajen sin esfuerzo por los mares y debajo de ellos y por el aire con un peligro mínimo y a gran velocidad y que experimenten una vida mucho más longeva que la nuestra a medida que la enfermedad decaiga y el ser humano logre comprender lo que le hace envejecer. Este es el pronóstico de una era de paz. (Strauss, 1954: 5)

En 1971 Glen Seaborg, presidente de la Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos, pronosticó que en 2000 la mitad de la generación de electricidad de Estados Unidos provendría de reactores nucleares no contaminantes y seguros y que naves espaciales de propulsión nuclear transportarían personas a Marte (Seaborg, 1972). En realidad, en la década de 1980 se produjo un parón casi completo de los pedidos de plantas nucleares en Occidente, y las sombrías perspectivas de la fisión se vieron aún más dañadas en 1986 por el accidente de Chernóbyl y en 2011 por las múltiples explosiones de Fukushima. Progresivamente las turbinas eólicas y la energía fotovoltaica ocuparon el vacío mítico dejado por la fisión con una promesa de generación de electricidad sencillísima y baratísima, capaz de descender en forma de red descentralizada (eliminando todas las centrales de generación de electricidad) sobre el mundo moderno cual maná (visión que requiere ignorar el hecho de que la mayor parte de la población mundial pronto vivirá en megalópolis, difícilmente el mejor lugar para la producción de energía descentralizada). Y luego está —como siempre desde 1945— la madre de todas las promesas: la electricidad derivada de la fusión nuclear. Aunque conviene subrayar que en la práctica estamos igual de lejos de este objetivo ahora que hace una generación.

En efecto, un crecimiento en el consumo de energía no garantiza nada por sí mismo, excepto un mayor impacto ambiental (Smil, 1991). El análisis histórico es claro. Un mayor consumo de energía no garantiza un suministro fiable de alimentos (la Rusia zarista, gran consumidora de madera, era exportadora de cereales; la URSS, que era una superpotencia fósil, tenía que importar cereales); no confiere seguridad estratégica (Estados Unidos era un país más seguro en 1915 que en 2015); no sustenta con seguridad la estabilidad política (ni en Brasil, ni en Italia ni en Egipto); no conduce necesariamente a un gobierno más ilustrado (tomemos por caso Corea del Norte o Irán); y no trae consigo un aumento adecuadamente repartido del nivel de vida de un país (por ejemplo, en Guatemala o Nigeria).

La oportunidad para una gran transición hacia una sociedad menos consumidora de energía se halla principalmente entre los grandes consumidores de energía y materiales en Europa occidental, América del Norte y Japón. Muchas formas de ahorro energético podrían llevarse a cabo con sorprendente facilidad. Coincido con Basalla (1980: 40) en que

> si la ecuación energía-civilización no tiene valor y resulta potencialmente peligrosa, debería ser denunciada y descartada porque proporciona un argumento supuestamente científico contra los esfuerzos para adoptar estilos de vida basados en niveles más bajos de consumo de energía. Si, por el contrario, es una generalización adecuada e intelectualmente potente, entonces merece un tratamiento más sofisticado y riguroso que el que ha recibido por parte de sus defensores hasta la fecha.

La civilización moderna consume recursos (energía, alimentos, agua, metales) de manera muy ineficiente. Por eso he defendido siempre formas más racionales de consumo de recursos. Esto tendría profundas consecuencias a la hora de evaluar las perspectivas de una

civilización muy consumidora de energía. Sin embargo, cualquier sugerencia de reducción deliberada de determinadas formas de consumo de recursos es rechazada por quienes creen que el avance técnico infinito puede satisfacer una demanda en constante crecimiento. En cualquier caso, resulta imposible cuantificar la probabilidad de que adoptemos un sistema de consumo de recursos en general y energía en particular basado en la racionalidad, la moderación y la contención, y más aún la probabilidad de que perseveremos en esa dirección.

Las dos características fundamentales de la vida han sido la expansión y el crecimiento de la complejidad. ¿Podemos invertir esta tendencia y adoptar un modelo de consumo de energía moderado (técnicamente factible y ambientalmente deseable)? ¿Podemos hacer avanzar la evolución humana concentrándonos solo en aquellos aspectos que no requieren maximizar los flujos de energía? ¿Podemos crear una civilización energéticamente estable que viva dentro de sus límites solares/biosféricos? ¿Puede llevarse a cabo este cambio sin que la economía y la población mundial tengan que contraerse? Para las personas, esto significaría desvincular de manera radical el estatus social del consumo material. Crear tales sociedades sería especialmente costoso para las generaciones que pusieran en marcha la transición. A largo plazo, este nuevo sistema también debilitaría uno de los principales resortes de progreso del mundo occidental: la búsqueda de movilidad social y económica. ¿O puede la innovación técnica ayudarnos a aprovechar de manera directa y eficiente una parte cada vez mayor de la radiación entrante y salvaguardar nuestra adicción a un sinfín de comodidades extrasomáticas?

Nuestro sistema energético actual es autolimitado: incluso en una escala de tiempo histórica, nuestra civilización de alto consumo de energía, que explota reservas de radiación antigua transformada en combustibles, es solo un interludio, porque, aunque la combustión de dichos combustibles no tuviera ningún impacto ambiental, no podría, a diferencia de sus predecesores, basados en el aprovechamiento de

flujos de energía solar casi instantáneos, durar milenios. Pero el eventual agotamiento de las energías fósiles es muy poco probable, porque la combustión de carbón e hidrocarburos es la principal fuente de CO_2 antropogénico, de tal manera que la combustión de las reservas de combustibles fósiles disponibles elevaría la temperatura troposférica lo suficiente como para eliminar toda la capa de hielo de la Antártida y provocar un aumento del nivel del mar de 58 m (Winkelmann *et al*., 2015).

Como la mayoría de la población mundial vive en regiones costeras, este aumento tendría profundas consecuencias para la supervivencia de la civilización. Los flujos disponibles de energías renovables son lo suficientemente grandes como para evitar este destino. Pero para mantener —o expandir en el caso de los miles de millones de personas que viven en economías pobres— los niveles de consumo de energía prevalecientes en la actualidad tendríamos que capturarlos, convertirlos y almacenarlos en escalas de órdenes de magnitud superiores a las actuales. Esta transición de época de un sistema energético mundial dominado por combustibles fósiles a un nuevo régimen basado únicamente en corrientes de energía renovable presenta un enorme (y generalmente poco apreciado) desafío: la ubicuidad y la magnitud de nuestra dependencia respecto a los combustibles fósiles y la necesidad de aumentar aún más el consumo de energía mundial significan que incluso una transición radical requeriría varias generaciones.

La transición completa requeriría la sustitución de los combustibles fósiles no solo como proveedores dominantes de diferentes tipos de energía, sino también como fuentes críticas de materias primas: materias primas para la síntesis de amoníaco (175 Mt/año en 2015, principalmente para suministrar nitrógeno a los cultivos) y otros fertilizantes y productos agroquímicos (herbicidas y pesticidas); plásticos (cuya producción total es de 300 Mt/año); coque metalúrgico (que hoy en día requiere 1 Gt/año de carbón coquizable y se utiliza no solo como fuente de energía para reducir óxidos de

hierro, sino también por su papel estructural de apoyo al mineral de hierro cargado y la caliza en altos hornos que producen más de 1 Gt/año de hierro); lubricantes (esenciales para el funcionamiento de las máquinas estacionarias y móviles); y materiales de pavimentación (asfalto barato).

Nuestra incapacidad para comprender el comportamiento de sistemas complejos e interdependientes —las interacciones de los procesos biosféricos, el consumo de la producción de energía, la actividad económica, el progreso técnico, el cambio social, la vida política o las agresiones militares— conlleva que cualquier escenario específico de futuro distante (hoy en día tan comúnmente comunicados) sea una mera especulación. Por el contrario, es fácil definir extremos, pues las visiones de futuro van de lo más lúgubre a lo más extático. La de Georgescu-Roegen (1975: 379) no era esperanzadora: «Tal vez el destino del ser humano sea tener una vida corta pero ardiente, excitante y extravagante en lugar de una existencia larga, sin accidentes y vegetativa. Dejemos que otras especies —las amebas, por ejemplo, que no tienen ambiciones espirituales— hereden esta tierra bañada aún por un montón de sol». En contraste, los tecnooptimistas imaginan un futuro en el que la energía es ilimitada —ya sea a partir de células fotovoltaicas supereficientes o fusión nuclear— y la humanidad coloniza otros planetas adecuadamente terraformados a imagen y semejanza de la Tierra. En el futuro previsible (2-4 generaciones, 50-100 años) considero que tales visiones expansivas no son otra cosa que cuentos de hadas.

La única certeza es que las posibilidades de éxito en la búsqueda sin precedentes de un nuevo sistema de energía compatible con la supervivencia a largo plazo de una civilización muy consumidora en energía siguen siendo inciertas. Dado nuestro grado de comprensión actual, el desafío podría resultar relativamente menos difícil de solucionar que otros obstáculos superados en el pasado. Pero el conocimiento, por impresionante que sea, no será suficiente. Lo que

necesitamos es un compromiso concreto de cambio. De modo que podríamos decir, con Senancour (1770-1846):

> El ser humano perece. De acuerdo, pero luchemos aunque perezcamos; y si la nada debe ser nuestro destino, esforcémonos para que no nos llegue como una justa recompensa. (Senancour, 1901 [1804], 2:187).

ADENDA

MEDIDAS BÁSICAS

La longitud, la masa, el tiempo y la temperatura son las unidades básicas de las cuentas científicas. El metro (m) es la unidad básica de la longitud. Para una persona de tamaño medio es aproximadamente la distancia entre la cintura y el suelo. La mayoría de las personas miden entre 1,5 y 1,8 m; los techos de las casas estadounidenses tienen una altura de unos 2,5 m; una pista olímpica de atletismo mide 400 m y una pista de aterrizaje de avión, unos 3.000 m. Se utilizan prefijos griegos estándar para expresar los múltiplos de las unidades científicas. Kilo significa mil: 3.000 m son 3 kilómetros (km). Una maratón tiene 42,195 km, un vuelo estadounidense de costa a costa 4.000 km, la circunferencia ecuatorial unos 40.000 km, la luz recorre 300.000 km cada segundo y 150 millones de km separan la Tierra del Sol. Para las unidades fraccionarias se utilizan prefijos latinos estándar. Un centímetro es la centésima parte de un metro. Un puño apoyado en una mesa con el pulgar junto a los dedos doblados mide unos 10 cm (0,1 m). Los lápices nuevos miden 20 cm (0,2 m) y los bebés recién nacidos, unos 50 cm (0,5 m).

Las unidades de superficie más comunes van desde los cm^2 hasta los km^2. Un posavasos cubre 10 cm^2, una cama 2 m^2 y los cimientos de un pequeño *bungalow* americano 100 m^2. Esta superficie (10 × 10 m) se denomina área, y 100 (hecto) de estos cuadrados suman una hectárea (ha), la unidad métrica básica utilizada para medir tierras agrícolas. Los chinos o los bangladesíes se alimentan con menos de 0,1

ha/cápita, mientras que los estadounidenses cultivan casi 1 ha/cápita. Fuera de la agricultura, las grandes superficies suelen expresarse en kilómetros cuadrados (km^2). Las ciudades norteamericanas de alrededor de un millón de habitantes suelen ocupar menos de 500 km^2, los pequeños países europeos tienen bastante menos de 100.000 km^2 y Estados Unidos mide casi 10 millones de km^2.

Las unidades de masa básicas se pueden obtener fácilmente llenando cubos con agua. Un cubo muy pequeño de un centímetro cúbico (cm^3) —cuyo lado será tan largo como el ancho de una uña pequeña— pesará (o más exactamente tendrá una masa de) un gramo (g) cuando esté lleno de agua. Un cubo del tamaño de un puño tendrá un volumen de 1.000 cm^3 (10 × 10 × 10 cm) o un litro (l). Cuando esté lleno de agua, tendrá una masa de 1.000 gramos (g) o un kilogramo (kg). El kilogramo es la unidad básica de masa. Los refrescos pesan alrededor de un tercio de kilo (350 g), los bebés recién nacidos entre 3 y 4 kg, y la mayoría de adultos no estadounidenses entre 50 y 90 kg. Los coches compactos tienen una masa de 1.000 kg o una tonelada (también llamada tonelada métrica, cuyo símbolo es t; la tonelada corta estadounidense tiene solo 907 kg). Un caballo grande puede llegar a pesar 1 t, los vagones de ferrocarril 30-100 t y los barcos entre unos pocos miles y 500.000 t.

El segundo (s), un lapso de tiempo ligeramente más largo que el latido de un corazón, es la unidad básica de tiempo. En reposo respiramos cada cuatro segundos y tardamos unos diez en beber un vaso de agua. Las unidades de tiempo mayores son excepciones dentro del sistema métrico de unidades científicas. No crecen con múltiplos de 10, sino que siguen el antiguo conteo sexagesimal (de base 60) sumerio-babilónico. Un semáforo en rojo en un cruce con mucho tráfico dura 60 segundos, es decir, un minuto. Hervir un huevo requiere ocho minutos; una obra media de sinfonía clásica dura 40 minutos. Un embarazo normal dura 280 días; cada año no bisiesto tiene 365 días o 31,536 millones de segundos; la vida media de las mujeres en los países occidentales ya supera los 80 años; la agricultura

empezó a extenderse hace 10.000 años; los dinosaurios abundaban hace 80 millones de años; y la Tierra tiene unos 4.500 millones de años.

La escala científica de la temperatura, los grados Kelvin, comienza en el cero absoluto. La escala Celsius (C) es más común: divide el intervalo entre el punto de congelación y el de ebullición del agua en 100 grados (°C). En esa escala, el cero absoluto es -273,15 °C, el agua se congela a 0 °C, un buen día de primavera ronda los 20 °C y la temperatura humana normal es de 37 °C. El agua hierve a 100 °C, el papel se enciende a 230 °C, el hierro se funde a 1.535 °C y las reacciones termonucleares del Sol se producen a 15 millones de °C.

Casi todas las demás unidades científicas pueden derivarse de la longitud, la masa, el tiempo y la temperatura. Para la energía y la potencia, las derivaciones son las siguientes. La fuerza que actúa sobre una masa de 1 kg con una aceleración de 1 m/s^2 es igual a un newton (N). La fuerza de 1 N aplicada sobre una distancia de 1 m equivale a un julio (J), la unidad básica de energía. La caloría, una unidad de energía utilizada a menudo en los escritos nutricionales, equivale a 4,184 J. Ambas son cantidades pequeñas: el consumo diario de alimentos de una mujer adulta activa es de solo 2.000 calorías (2 Mcal) o 8,36 MJ. La potencia es energía por tiempo, por lo que 1 J/s equivale a un vatio (W). En la sección «La potencia en la historia», más adelante, se enumeran una gran variedad de acciones en orden ascendente de vatios.

Muchas unidades, como las de velocidad —metros por segundo (m/s) o kilómetros por hora (km/h)— y productividad —kilogramos o toneladas por hora (kg/h, t/h) o toneladas por año (t/año)— no tienen un nombre especial. Los caballos de trabajo se mueven a una velocidad de 1 m/s; la mayoría de los límites de velocidad en las carreteras se sitúan en torno a los 100 km/h. Un esclavo que molía el grano con un quern de piedra producía harina a una velocidad no superior a los 4 kg/h; una excelente cosecha de trigo de finales de la Edad Media era de 1 t/ha.

La mayoría de las medidas que aparecen en el texto están descritas aquí. Además de las unidades de energía y potencia, son las dos unidades físicas básicas de longitud y masa (m y kg), dos medidas de superficie (ha y km^2) y los cuatro marcadores de tiempo (segundo, hora, día y año). A continuación figura la lista completa de prefijos, si bien solo algunos de ellos (en orden ascendente: hecto-, kilo-, mega-, giga-; y descendente: mili-, micro-) se utilizan con frecuencia.

Unidades científicas y sus múltiplos y submúltiplos

Unidades científicas básicas

Cantidad	Nombre	Símbolo
Distancia	Metro	m
Masa	Kilogramo	kg
Tiempo	Segundo	s
Corriente eléctrica	Amperio	A
Temperatura	Kelvin	K
Cantidad de sustancia	Mol	mol
Intensidad luminosa	Candela	cd

Otras unidades utilizadas en el texto

Cantidad	Nombre	Símbolo
Área	Hectárea	ha
	Metro cuadrado	m^2
Potencial eléctrico	Voltio	V
Energía	Julio	J
Fuerza	Newton	N

Masa	Gramo	g
	Tonelada	t
Potencia	Vatio	W
Presión	Pascal	Pa
Temperatura	Grado Celsius	°C
Volumen	Metro cúbico	m^3

Múltiplos utilizados en el Sistema Internacional de Unidades

Prefijo	**Abreviación**	**Notación científica**
deca	Da	10^1
hecto	H	10^2
kilo	K	10^3
mega	M	10^6
giga	G	10^9
tera	T	10^{12}
peta	P	10^{15}
exa	E	10^{18}
zeta	Z	10^{21}
yota	Y	10^{24}

Submúltiplos utilizados en el Sistema Internacional de Unidades

Prefijo	**Abreviación**	**Notación científica**
deci	D	10^{-1}

centi	C	10^{-2}
mili	M	10^{-3}
micro	M	10^{-6}
nano	N	10^{-9}
pico	P	10^{-12}
femto	F	10^{-15}
atto	A	10^{-18}
zepto	Z	10^{-21}
yocto	Y	10^{-24}

Cronología de los avances relacionados con la energía

Esta lista ha sido elaborada a partir de una gran variedad de fuentes citadas en el texto y en la bibliografía. Se pueden encontrar cronologías más extensas de los avances técnicos en Mumford (1934), Gille (1978), Taylor (1982), Williams (1987) y Bunch y Hellemans (1993), y los lectores que deseen ver las cronologías más extensas de los avances relacionados con la energía (enumerados por fuentes de energía, aplicaciones e impactos) deben consultar un volumen de casi 1.000 páginas de Cleveland y Morris (2014). Por razones de espacio, esta lista se limita principalmente a los avances prácticos (y algunos fracasos notables), pero excluye las contribuciones intelectuales, científicas, políticas y económicas subyacentes. Todas las fechas más antiguas son aproximaciones inevitables, y diferentes fuentes pueden proporcionar cronologías diferentes. Existen discrepancias incluso respecto a los avances modernos: las fechas pueden referirse a la idea original, la patente, la primera aplicación práctica o la comercialización con éxito. Para conocer los problemas de datación de los inventos, véase Petroski (1993).

a. C.

+ 1700.000	Herramientas de piedra olduyavenses (<0,5 m de filo/kg de piedra)
+ 250.000	Herramientas de piedra achelenses
+ 150.000	Herramientas de piedra musterienses
+ 50.000	Objetos hechos de hueso
+ 30.000	Herramientas de piedra auriñacienses
	Arco y flechas de piedra
+ 15.000	Herramientas de piedra del Magdaleniense (12 m de filo/kg de piedra)
+ 9.000	Ovejas domesticadas en Oriente Medio
+ 7.400	Maíz en el Valle de Oaxaca
+ 7.000	Trigo en Mesopotamia
	Cerdos domesticados en Oriente Medio
+ 6.500	Ganado domesticado en Oriente Medio
+ 6.000	Artefactos de cobre cada vez más comunes en Oriente Medio
+ 5.000	Cebada en Egipto
	Maíz en la cuenca de México
+ 4.400	Patata en las tierras altas de Perú y Bolivia
+ 4.000	Arados ligeros de madera en Mesopotamia
+ 3.500	Asnos de carga en Oriente Medio

	Barcos de madera en el Mediterráneo
	Cerámica y ladrillos cocidos en hornos en Mesopotamia
	Riego en Mesopotamia
+ 3.200	Vehículos de ruedas en Uruk
+ 3.000	Vela cuadrada en Egipto
	Bueyes de tiro en Mesopotamia
	Domesticación del camello
	Rueda de alfarero en Mesopotamia
+ 2.800	Construcción de pirámides en Egipto
+ 2.500	Bronce en Mesopotamia
	Pequeños objetos de vidrio en Egipto
+ 2.000	Rueda de radios en Mesopotamia
	Vehículos tirados por caballos en Egipto
	Shaduf en Mesopotamia
+ 1.700	Monta (a caballo)
+ 1.500	Cobre en China
	Arroz con cáscara en China
	Lubricantes para ejes en Oriente Medio
+ 1.400	Hierro en Mesopotamia
+ 1.300	Sembradora en Mesopotamia
	Carros tirados por caballos en China
+ 1.200	Hierro cada vez más común en India, Oriente Medio y

	Europa
+ 800	Arqueros montados en las estepas asiáticas
	Velas en Oriente Medio
+ 600	Estaño en Grecia
	Pentecónteros comunes en Grecia
	Tornillo de Arquímedes en la irrigación egipcia
+ 500	Silla de montar en camello en el norte de Arabia
	Trirreme en Grecia
+ 400	Ballesta en China
432	Se completa el Partenón
+ 300	Estribos en China
	Engranajes en Egipto y Grecia
312	*Via Appia* y *Aqua Appia* romanas completadas
+ 200	Arnés de pecho en China
	Avances en la navegación a barlovento en China
	Velas reforzadas con sable en China
	Perforación por percusión en Sichuan
	Manivela en China
+ 150	Arados de vertedera de hierro en China
+ 100	Comienzos de la collera en China
	Calefacción doméstica por carbón en China
	Ruedas hidráulicas en Grecia y Roma

	Carretilla en China
	Norias en Oriente Medio
+ 80	Calefacción por hipocausto en Roma

d. C.

300	El *cursus publicus* romano supera los 80.000 km
+ 600	Molinos de viento (Irán)
+ 850	Vela triangular en el Mediterráneo
+ 900	El arnés de collera y las herraduras se hacen comunes en Europa
	Lanzas de bambú en China
+ 980	Esclusa de canal en China
+ 1000	Adopción generalizada de las ruedas hidráulicas en Europa occidental
1040	Directrices claras para la preparación de la pólvora en China
+ 1100	Arco largo en Inglaterra
+ 1150	Difusión de los molinos de viento en Europa occidental
+ 1200	Construcción de caminos incaicos
+ 1280	Cañones en China

+ 1300	Pólvora y cañones en Europa
1327	Finalización del Gran Canal Pekín-Hangzhou (1.800 km de longitud)
+ 1350	Cañones de mano en Europa
+ 1400	Caballos de tiro pesados en Europa
	Molinos de viento de drenaje en los Países Bajos
	Altos hornos en la región del Rin
+ 1420	Las carabelas portuguesas realizan navegaciones más largas
1487	Colón cruza el Atlántico en barco
1492	Vasco da Gama navega hacia la India
1519	La Victoria de Magallanes circunnavega la Tierra
+ 1550	Grandes barcos de vela con cañones en Europa occidental
+ 1600	Rodamientos de bolas en Europa occidental
+ 1640	La minería del carbón inglesa se expande
1690	Experimentos con la máquina de vapor atmosférica (Denis Papin)
1698	Máquina de vapor simple y pequeña (Thomas Savery)
1709	Coque de carbón bituminoso (Abraham Darby)
1712	Máquina de vapor atmosférica (Thomas Newcomen)

1745	Cola de abanico de aspas para el giro automático de los molinos de viento
+ 1750	Construcción intensiva de canales en Europa occidental
	El uso del coque se extiende en la fabricación inglesa de hierro
	El motor de Newcomen se generaliza en las minas de carbón inglesas
1757	Torno de corte de precisión (Henry Maudslay)
1769	James Watt patenta un condensador independiente para la máquina de vapor
Década de 1770	Fábricas impulsadas por ruedas hidráulicas
1775	La patente de Watt se prolonga hasta 1800
1782	Globo aerostático (Joseph y Etienne Montgolfier)
1794	Lámparas con portamechas y chimeneas de vidrio (Aimé Argand)
1800	Pila eléctrica (Alessandro Volta)
Década de 1800	Barcos de vapor (Charlotte Dundas, Clermont) Máquinas de vapor de alta presión (R. Trevithick, O. Evans)
1805	Grúa de vapor (John Rennie)
	Gas de ciudad en Inglaterra
1808	Lámpara de arco (Humphrey Davy)
1809	Se descubren los nitratos chilenos

1816	Lámpara de seguridad en las minas (Humphrey Davy)
Década de 1820	Diseño de calculadoras mecánicas (Charles Babbage)
	Cascos de barcos de hierro
1820	Electromagnetismo (Hans C. Oersted)
1823	Silicio aislado (J. J. Berzelius)
1824	Cemento Portland (Joseph Aspdin)
	Aislamiento del aluminio (Hans C. Oersted)
1825	Ferrocarril Stockton-Darlington
1828	Chorreado en caliente en la fabricación de hierro (James Neilson)
1829	Locomotora Rocket (Robert Stephenson)
Década de 1830	Inicio de la construcción de ferrocarriles en Inglaterra
	El barco de vapor cruza el Atlántico
	Cosechadora mecánica de grano (Cyrus McCormick, Obed Hussey)
1830	Termostato (Andrew Ure)
	Ferrocarril Liverpool-Manchester
1832	Turbina hidráulica (Benoît Fourneyron)
1833	Arado de acero (John Lane)
	El barco de vapor Royal William cruza el Atlántico de Quebec a Londres
1834	Cocina independiente (Philo P. Stewart)

1837	Se patenta el telégrafo eléctrico (William F. Cooke y Charles Wheatstone)
1838	Hélice de propulsión para buques de vapor (John Ericsson)
	Código telegráfico (Samuel Morse)
Década de 1840	Década álgida de la caza de ballenas en Estados Unidos
1841	Trilladora de vapor
	Thomas Cook ofrece viajes de vacaciones
1847	Turbina de agua de flujo interno (James B. Francis)
Década de 1850	Parafina de aceite para el alumbrado
	Clíperes rápidos en viajes largos
1852	Dirigible lleno de hidrógeno (Henri Giffard)
1854	Barco de vapor Great Eastern (Isambard K. Brunel)
1856	Convertidor de acero (Henry Bessemer)
1858	Cosechadora de cereales (C. W. y W. W. Marsh)
1859	Perforación petrolífera en Pensilvania (E. L. Drake)
Década de 1860	Arado de vapor en los grandes campos americanos
1860	Motor de combustión interna horizontal (J. J. E. Lenoir)
	Máquina de ordeñar (L. O. Colvin)
1864	Proceso de fabricación de acero a cielo abierto (W. y F. Siemens)

1865	Nitrocelulosa (J. F. E. Schultze)
1866	Pila de carbono-zinc (Georges Leclanche)
	Cable transatlántico en funcionamiento permanente
	Torpedo (Robert Whitehead)
1867	Puesta en servicio de los vagones de ferrocarril refrigerados
1869	Finalización del canal de Suez
	Finalización del ferrocarril transcontinental de Estados Unidos
Década de 1870	Transporte refrigerado de carne en buques oceánicos
	Comienza la industria de los fertilizantes de fosfato
1871	Dínamo con armadura de anillo (Z. T. Gramme)
1874	Película fotográfica (George Eastman)
1875	Dinamita (Alfred Nobel)
1876	Motor de combustión interna de cuatro tiempos (N. A. Otto)
	Se patenta el teléfono (Alexander Graham Bell, Elisha Gray)
1877	Fonógrafo (Thomas A. Edison)
1878	Motor de combustión interna de dos tiempos (Dugald Clerk)
	Bombilla de filamento (Joseph Swan)
	Anudador de hilo para cosechadora de grano (John Appleby)

1879	Bombilla de filamento de carbono (Thomas A. Edison)
Década de 1880	Cosechadoras de grano tiradas por caballos (California)
	Bicicletas modernas (J. K. Starley, William Sutton)
	Barcos cisterna de petróleo
	Formulación de explosivos militares de alta potencia
1882	Primeras centrales eléctricas de Edison
1883	Turbina de vapor de impulso (Carl Gustaf de Laval)
	Motor de cuatro tiempos alimentado por líquido (Gottlieb Daimler)
	Ametralladora (Hiram S. Maxim)
1884	Turbina de vapor (Charles Parsons)
1885	Transformador (William Stanley)
	Karl Benz construye el primer coche práctico
1886	Hormigón pretensado (C. E. Dochring)
	Producción de aluminio (C. M. Hall y P. L. T. Héroult)
1887	Se descubre petróleo en Texas
	Generación de ondas electromagnéticas (Heinrich Hertz)
1888	Motor eléctrico de inducción (Nikola Tesla)
	Gramófono (Emile Berliner)
	Neumático de caucho lleno de aire (John B. Dunlop)
1889	Fonógrafo con cilindros de cera (Thomas A. Edison)
	Turbina de agua accionada por chorro (Lester A. Pelton)

Década de 1890	Presencia récord de caballos en las ciudades occidentales
	Introducción de los electrodomésticos
1892	Motor diésel (Rudolf Diesel)
1894	Perforación petrolífera en alta mar desde embarcaderos (California)
1895	Imágenes en movimiento (Louis y Auguste Lumière)
	Rayos X (Wilhelm K. Roentgen)
1897	Tubo de rayos catódicos (Ferdinand Braun)
1898	Magnetófono (Valdemar Poulsen)
1899	Transmisión de señales de radio a través del canal de la Mancha
	(Guglielmo Marconi)
Década de 1900	Inicio del consumo de electricidad en Estados Unidos y Reino Unido
	Comienza la producción en serie de automóviles
1900	Dirigible (Ferdinand von Zeppelin)
1901	Aire acondicionado industrial (Willis H. Carrier)
	Perforación rotatoria (Spindletop, Texas)
	Transmisión de señales de radio a través del Atlántico (Guglielmo Marconi)
1903	Vuelo controlado sostenido con motor (Oliver y Wilbur Wright)
1904	Generación de electricidad geotérmica (Lardarello, Italia)

	Diodo de vacío (John A. Fleming)
1905	Célula fotoeléctrica (Arthur Korn)
	Producción comercial de tractores en Estados Unidos
1906	Lanzamiento del acorazado británico Dreadnought
	Triodo de vacío (Lee De Forest)
1908	Bombilla de tungsteno
	Ford Modelo T (fabricado hasta 1927)
1909	Fresa para perforar rocas (Howard Hughes)
	Louis Blériot cruza el canal de la Mancha
	Baquelita, el primer plástico importante (Leo Baekeland)
1910	Luz de neón (Georges Claude)
	Gas sintético procedente del carbón (Fischer-Tropsch, Alemania)
1913	Línea de producción en movimiento (Compañía Ford)
	Finalización del canal de Panamá
	Síntesis del amoníaco (Fritz Haber y Carl Bosch)
	Craqueo de petróleo crudo a alta presión (W. M. Burton)
1914	Primera Guerra Mundial (hasta 1918): guerra de trincheras y de gases,
	aviones, tanques
1919	Vuelo transatlántico sin escalas (J. Alcock y A. W. Brown)
	Servicio aéreo regular (París-Londres)
Década de 1920	Calderas que queman carbón pulverizado

	Carrocerías metálicas aerodinámicas
	Tocadiscos eléctricos
	Difusión de la radio en Norteamérica y Europa
	Licuefacción del carbón (Friedrich Bergius)
1920	Turbina de agua de flujo axial (Viktor Kaplan)
1922	Botadura del portaaviones Hosho en Japón
1923	Tubo de cámara electrónica (Vladimir Zworykin)
	Refrigeradores eléctricos de Electrolux
1927	Caucho sintético (Buna)
	Vuelo transatlántico en solitario sin escalas (Charles A. Lindbergh)
	Descubrimiento de petróleo en Kirkuk (Irak)
1928	Plexiglás (W. Bauer)
1929	Emisiones experimentales de televisión (Reino Unido)
Década de 1930	Craqueo catalítico del petróleo (Eugene Houdry)
	Grandes hidroestaciones (Estados Unidos y URSS)
	Bombarderos de larga distancia
	Uso de clorofluorocarbonos en la refrigeración
1933	Polietileno (Imperial Chemical Industries)
1935	Luz fluorescente (General Electric)
	Cinta magnética de plástico (AEG Telefunken, I. G. Farben)
	Nailon (Wallace Carothers)

1936	Emisión regular de televisión (BBC)
	Turbina de gas (Brown-Boveri)
1937	Avión totalmente presurizado (Lockheed XC-35)
1938	Prototipo de caza de reacción (Hans Pabst von Ohain)
1939	Radar (Reino Unido)
	Segunda Guerra Mundial (hasta 1945): *Blitzkrieg*
Década de 1940	Aviones militares de reacción
	Ordenadores electrónicos
1940	Helicóptero (Igor Sikorsky)
1942	Cohetes V-1 (Wernher von Braun)
	Producción industrial de silicona
	Reacción en cadena controlada (Enrico Fermi, Chicago)
1944	Cohetes V-2
	Comercialización del DDT
1945	Bombas nucleares (prueba Trinity, Hiroshima y Nagasaki)
	Ordenador electrónico (ENIAC, Estados Unidos)
	Comercialización del primer herbicida (2,4-D)
1947	Transistor (J. Bardeen, W. H. Brattan y W. B. Shockley)
	Perforación *offshore* sin tierra a la vista (Luisiana)
	Vuelo pilotado por encima de la velocidad del sonido (Bell X-1)
1948	Horno de fabricación de acero con oxígeno básico (Linz-

	Donawitz)
	Se descubre el mayor yacimiento de petróleo del mundo (Saudi al-Ghawar)
1949	Primer avión de pasajeros (De Havilland Comet)
Década de 1950	Rápido crecimiento del consumo mundial de petróleo crudo
	Fundición continua de acero
	Se extienden los precipitadores electrostáticos
	Ordenadores comerciales
	Grabaciones en estéreo
	Grabadores de vídeo
1951	Montaje automático de motores (Ford)
	Transmisión de imágenes de televisión en color
	Bomba de hidrógeno (fusión)
1952	El avión de pasajeros británico Comet entra en servicio
1953	Horno microondas (Raytheon Manufacturing Company)
1954	Lanzamiento del submarino nuclear Nautilus de la Marina estadounidense
1955	Radio Sony totalmente transistorizada
1956	Primera central nuclear comercial (Calder Hall, Reino Unido)
	Cable telefónico transatlántico
	Comienza la construcción de carreteras interestatales en Estados Unidos

1957	Sputnik 1, el primer satélite artificial de la Tierra (URSS)
	Primera central nuclear de Estados Unidos (Shippingport, Pensilvania)
1958	Circuito integrado (Texas Instruments)
	Entra en servicio el avión de pasajeros Boeing 707 de Estados Unidos
Década de 1960	Plataformas semisumergibles para la perforación *offshore*
	Satélites meteorológicos y de comunicaciones
	Barcos cisterna gigantes para el transporte de petróleo
	Despliegue a gran escala de misiles balísticos intercontinentales (o ICBM por sus siglas en inglés)
	Pruebas en la atmósfera de las mayores bombas de fusión soviéticas
	Difusión del uso de fertilizantes y pesticidas sintéticos
	Variedades de cultivos de alto rendimiento
1960	Prueba del sistema de armamento estadounidense Minuteman ICBM
1961	Lanzamiento del portaaviones de propulsión nuclear estadounidense Enterprise
	Vuelo espacial tripulado (Yuri Gagarin)
1962	Retransmisión de televisión transatlántica (Telstar)
1964	Comienza a funcionar el Shinkansen (Ferrocarriles Nacionales de Japón)
1966	Despegue del avión jumbo estadounidense Boeing 747
1969	Despegue del avión supersónico británico-francés Concorde

	El Boeing 747 entra en servicio
	La nave espacial estadounidense Apolo 11 aluniza
Década de 1970	Transmisión de radio y televisión por satélite
	Preocupación por el suministro de combustibles fósiles
	Lluvia ácida en Europa y Norteamérica
	Las exportaciones de automóviles japoneses se disparan
1971	Primeros microprocesadores (Intel, Texas Instruments)
1973	Primera ronda de subidas de precios del petróleo de la OPEP (hasta 1974)
1975	Brasil comienza a producir etanol para automóviles a partir de caña de azúcar
1976	El Concorde entra en servicio comercial
	Amartizaje de la nave espacial estadounidense Viking (no tripulada)
1977	Vuelo con propulsión humana del Gossamer Condor
1979	Segunda ronda de subidas del precio del petróleo de la OPEP (hasta 1981)
Década de 1980	Inicio del mercado de los ordenadores personales
	Aparatos y coches más eficientes
	Preocupación por el cambio medioambiental global
	Se inicia la ingeniería genética
1982	Reproductor de CD (Philips, Sony)
1983	Comienza a funcionar el TGV francés (París-Lyon)

1985	Se identifica el agujero de ozono en la Antártida
1986	Desastre del reactor nuclear de Chernóbyl
1989	Se presenta la World Wide Web (Tim Berners-Lee)
1990	La población mundial supera los 5.000 millones de habitantes
1994	Lanzamiento de Netscape
1999	Comienza la adopción masiva de teléfonos inteligentes
Década de 2000	Instalación generalizada de turbinas eólicas y células fotovoltaicas
2000	Comienza la *Energiewende* alemana
2003	Se completa la presa de las Tres Gargantas (río Yangzi, China)
2007	Se inicia la fracturación hidráulica en Estados Unidos
2009	China se convierte en el mayor consumidor de energía del mundo
2011	Un tsunami y la mala gestión provocan el desastre nuclear de Fukushima
	La población mundial alcanza los 7.000 millones de habitantes
2014	Estados Unidos vuelve a ser el mayor productor mundial de gas natural
2015	La concentración media de CO_2 en la atmósfera alcanza las 400 ppm

Índices de potencia: de una vela a la civilización global

Acciones, motores primarios, convertidores	Potencia (W)
Pequeña vela de cera ardiendo (800 a. C.)	5
Niño egipcio accionando un tornillo de Arquímedes (500 a. C.)	25
Pequeño molino de viento estadounidense girando (1880)	30
Mujer china haciendo funcionar una máquina de aventar (100 a. C.)	50
Pulidoras de vidrio francesas trabajando con rapidez (1700)	75
Hombre fuerte pisando rápidamente una rueda de madera (1400)	200
Ordenador IBM utilizado para escribir la primera edición de este libro (1993)	287
Asno haciendo girar una muela de molino romana (100 a. C.)	300
Débil pareja de bueyes chinos arando (1900)	600
Buen caballo inglés haciendo girar un torno (1770)	750
Rueda de molino holandesa impulsada por ocho hombres (1500)	800

Caballo americano muy fuerte tirando de un carro (1890)	1.000
Corredor de larga distancia en los Juegos Olímpicos (600 a. C.)	1.400
Noria vertical romana haciendo girar una rueda de molino (100 a. C.)	1.800
Motor de vapor atmosférico de Newcomen bombeando agua (1712)	3.750
Motor del automóvil Curved Dash de Ransom Olds (1904)	5.200
Pentecóntero griego con 50 remeros a toda velocidad (600 a. C.)	6.000
Gran molino de viento de posta alemán triturando semillas oleaginosas (1500)	6.500
Caballo mensajero romano galopando (200 d. C.)	7.200
Gran molino de viento holandés drenando un pólder (1750)	12.000
Motor del Ford Modelo T a toda velocidad (1908)	14.900
Trirreme griega con 170 remeros a toda velocidad (500 a. C.)	20.000
Máquina de vapor de Watt enrollando carbón (1795)	20.000
Equipo de 40 caballos tirando de una cosechadora californiana (1885)	28.000
Cascada de 16 molinos de agua romanos en Barbegal	30.000

(350 EC)

Primera turbina de agua de Benoît Fourneyron (1832)	38.000
Bombas de agua para Versalles en Marly (1685)	60.000
Motor del Honda Civic GL (1985)	63.000
Turbina de vapor de Charles Parsons (1888)	75.000
Máquina de vapor de la estación de Edison en Pearl Street (1882)	93.200
La mayor máquina de vapor de Watt (1800)	100.000
Uso de la electricidad en un supermercado estadounidense (1980)	200.000
Motor diésel de un submarino alemán (1916)	400.000
Lady Isabella, la mayor noria del mundo (1854)	427.000
Gran locomotora de vapor a toda velocidad (1890)	850.000
Turbina de vapor de Parsons en la estación de Elberfeld (1900)	1.000.000
Obras hidráulicas de Shaw en Greenock, Escocia (1840)	1.500.000
Gran turbina eólica (2015)	4.000.000
Motor de cohete lanzando un misil V-2 (1944)	6.200.000
Turbina de gas que acciona un compresor de oleoducto (1970)	10.000.000

Motor diésel de un buque mercante japonés (1960)	30.000.000
Cuatro motores de avión del Boeing 747 (1969)	60.000.000
Reactor nuclear de Calder Hall (1956)	202.000.000
Turbogenerador de la central nuclear de Chooz (1990)	1.457.000.000
Motores de cohete lanzando el Saturno C 5 (1969)	2.600.000.000
Central nuclear de Kashiwazaki-kariwa (1997)	8.212.000.000
Consumo de energía primaria en Japón (2015)	63.200.000.000
Consumo de energía de carbón y biomasa en Estados Unidos (1850)	79.000.000.000
Consumo de energía comercial en EE. UU. (2010)	3.050.000.000.000
Consumo mundial de energía comercial (2015)	17.530.000.000.000

Potencia máxima de los motores primarios en el trabajo de campo (1700-2015)

Año	Acciones, motores principales	Potencia (W)
1700	Campesino chino arando un campo de coles	50
1750	Campesino italiano arando con un buey viejo y débil	200
1800	Campesino inglés arando con dos caballos pequeños	1.000

1870	Agricultor de Dakota del Norte arando con seis potentes caballos	4.000
1900	Agricultor de California utilizando 32 caballos para tirar de una cosechadora	22.000
1950	Agricultor francés cosechando con un tractor pequeño	50.000
2015	Agricultor de Manitoba arando con un gran tractor diésel	298.000

Potencia máxima de los motores primarios en el transporte terrestre (1700-2015)

Año	**Motores principales**	**Potencia (W)**
1700	Dos bueyes tirando de un carro	700
1750	Cuatro caballos tirando de un carro	2.500
1850	Locomotora de vapor inglesa	200.000
1900	La locomotora de vapor americana más rápida	1.000.000
1950	Potente locomotora diésel alemana	2.000.000
2006	Tren TGV francés de Alstom	9.600.000
2015	Tren Shinkansen de alta velocidad de la serie N700	17.080.000

Consumo medio anual (GJ/cápita) de energía primaria

Año	Motores principales	Potencia (W)
1700	Dos bueyes tirando de un carro	700
1750	Cuatro caballos tirando de un carro	2.500
1850	Locomotora de vapor inglesa	200.000
1900	La locomotora de vapor americana más rápida	1.000.000
1950	Potente locomotora diésel alemana	2.000.000
2006	Tren TGV francés de Alstom	9.600.000
2015	Tren Shinkansen de alta velocidad de la serie N700	17.080.000

Consumo medio anual (GJ/cápita) de energía primaria

	1750	1800	1850	1900	1950	2000
China	10	10	10	<15	<20	40
Reino Unido	30	60	80	115	100	150
Francia	<20	20	25	55	65	180
Japón	10	10	10	10	25	170
Estados Unidos	<80	<100	105	135	245	345
Mundo entero	<20	20	25	35	40	65

Nota: todos los índices están redondeados al 5 más cercano e incluyen toda la fitomasa (biocombustibles tradicionales y modernos), los combustibles fósiles y la

electricidad primaria.

BIBLIOGRAFÍA

Accede a la página de Energía y civilización. Una historia en arpaeditores.com para descargar de manera gratuita la bibliografía completa del libro en formato PDF.

A continuación indicamos las notas bibliográficas más importantes ordenadas por temas.

Los avances en el uso de la energía se describen sistemáticamente en los historiales de progreso técnico en varios volúmenes de Singer *et al.* (1954-1958), Forbes (1964-1972) y Needham *et al.* (1954-2015). Las cuestiones energéticas se tratan con mayor o menor detalle en muchos escritos que trazan la historia de los inventos y las prácticas de ingeniería. La lista básica debería incluir los libros de Byrn (1900), Abbott (1932), Mumford (1934), Usher(1954), Derry y Williams (1960), Burstall (1968), Kranzberg y Pursell (1967), Daumas (1969), Lindsay (1975), Gille (1978), L. White (1978), Landels (1980), Taylor (1982), Hill (1984), K. D. White (1984), Williams (1987), Basalla (1988), Pacey (1990), Finniston *et al.* (1992), Constable y Somerville (2003), Cleveland (2004), Smil (2005, 2006), McNeill *et al.* (2005), Billington y Billington (2006), Oleson (2008), Burke (2009), Weissenbacher (2009), Coopersmith (2010), Sørensen (2011) y Wei (2012).

Las contribuciones de los caballos a la civilización pueden apreciarse consultando a Lefebvre des Noëttes (1924), Smythe (1967), Dent (1974), Silver (1976), Villiers (1976), Telleen (1977), Langdon

(1986), Hyland (1990), Anthony (2007), McShane y Tarr (2007) y Oleson (2008). La larga historia de las ruedas hidráulicas y su importancia durante la época de la primera industrialización puede rastrearse en los volúmenes de Bresse (1876), Forbes (1965), Reynolds (1970), Hindle (1975), Reynolds (1983), Wikander (1983), Lewis (1997), Walton (2006), Malone (2009) y Mays (2010). La historia de los molinos de viento y su importancia económica están bien revisados en Wolff (1900), Skilton (1947), Freese (1957), Stockhuyzen (1963), Needham *et al.* (1965), Husslage (1965), Reynolds (1970), Wailes (1975), Torrey (1976), Harverson (1991) y Righter (2008). El desarrollo de los barcos de vela se describe ampliamente en Chatterton (1914), Torr (1964), Armstrong (1969) y Chapelle (1988). Los volúmenes sobre barcos de vela incluyen Morrison y Gardiner (1995) y Morrison, Coates y Rankov (2000).

Fuentes indispensables para la historia de las máquinas de vapor y sus usos son Farey (1827), Fry (1896), Croil (1898), Dalby (1920), Dickinson (1939), Watkins (1967), Jones (1973), Von Tunzelmann (1978), Hunter (1979), Ellis (1981), O'Brien (1983), Hills (1989) y Garrett y Wade-Matthews (2015). El desarrollo de los motores de combustión interna y las turbinas de gas se revisa en Diesel (1913), Constant (1981), Taylor (1984), Gunston (1986 y 1999), Cumpsty (2006) y Smil (2010b). La era del automóvil se describe en Beaumont (1906), Kennedy (1941), Sittauer (1972), May (1975), Flower y Jones (1981), Flink (1988), Cummins (1989), Ling (1990), Womack, Jones y Roos (1990) y Maxton y Wormald (2004). La historia del vuelo puede seguirse en Wright (1953), Constant (1981), Taylor (1989), Jakab (1990), Heppenheimer (1995), U.S. Centennial of Flight Commission (2003), Blériot (2015) y McCullough (2015).

Las propiedades y usos de las energías de la biomasa se tratan en Earl (1973), Smil (1983), Sieferle (2001) y Perlin (2005). Las historias de la industria del carbón son presentadas por Bald (1812), Jevons (1865), Nef (1932), Eavenson (1942), Flinn *et al.* (1984-1993), Church, Hall y Kanefsky (1986) y Thomson (2003). El desarrollo de

la industria del petróleo y el gas se recoge en Brantly (1971), Perrodon (1985), Yergin (2008) y Smil (2015a). Las décadas pioneras de la industria eléctrica y su posterior expansión son trazadas por Jehl (1937), MacLaren (1943), Lilienthal (1944), Josephson (1959), Dunsheath (1962), Electricity Council (1973), Hughes (1983), Cheney (1981), Friedel e Israel (1986), Schurr *et al.* (1990), Cantelon, Hewlett y Williams (1991), Nye (1992), Beauchamp (1997), Bowers (1998) y Hausman, Hertner y Wilkins (2008).

La literatura sobre la historia de las actividades humanas productivas es muy rica. Las perspectivas sobre el desarrollo agrícola, desde los orígenes de la agricultura hasta el siglo XX, pueden encontrarse en Bailey (1908), King (1927), Seebohm (1927), Buck (1930, 1937), Leser (1931), Lizerand (1942), Haudricourt y Delamarre (1955), Geertz (1963), Slicher van Bath (1963), Allan (1965), Boserup (1965, 1976), Perkins (1969), Titow (1969), Clark y Haswell (1970), White (1970), Fussell (1972), Ho (1975), Schlebecker (1975), Cohen (1977), Abel (1962), Xu y Dull (1980), Bray (1984), Rindos (1984), Mazoyer y Roudart (2006), Federico (2008) y Tauger (2010). Los detalles sobre la elevación del agua y el riego figuran en Ewbank (1870), Molenaar (1956), Needham *et al.* (1965), Butzer (1976), Oleson (1984, 2008) y Mays (2010). Los costes energéticos de la agricultura moderna se revisan en Pimentel (1980), Fluck (1992) y Smil (2008a).

Las reflexiones interdisciplinarias sobre los orígenes, el proceso y las consecuencias de la industrialización pueden encontrarse en Kay (1832), Clapham (1926), Ashton (1948), Landes (1969), Falkus (1972), Mokyr (1976, 2002), Clarkson (1985), Rosenberg y Birdzell (1986), Blumer (1990) y Stearns (2012). Muchos aspectos de las actividades de construcción se describen y explican en Ashby (1935), Fitchen (1961), Bandaranayke (1974), Baldwin (1977), Hodges (1989), Lepre (1990), Waldron (1990), Wilson (1990), Gies y Gies (1995), Lehner (1997) y Ching, Jarzombek y Prakash (2011). Las contribuciones a la historia del transporte incluyen libros de Savage

(1959), Hadfield (1969), Sitwell (1981), Piggott (1983), Ratcliffe (1985), Ville (1990), Gerhold (1993), Herlihy (2004), Levinson (2006) y Smil (2010b).

El progreso metalúrgico puede rastrearse en los libros de Biringuccio (1959 [1540]), Agricola (1912 [1556]), Bell (1884), Greenwood (1907), King (1948), Needham (1964), Straker (1969), Hogan (1971), Hyde (1977), Gold *et al.* (1984), Haaland y Shinnie (1985), Harris (1988), Geerdes, Toxopeus y Van der Vliet (2009) y Smil (2016). Las armas desde la antigüedad hasta los tiempos modernos y sus efectos en las sociedades se revisan en Mitchell (1932), Kloss (1963), Cipolla (1965), Ziemke (1968), Egg (1971), Singer y Small (1972), Kesaris (1977), McNeill (1989), Keegan (1994), Chase (2003), Parker (2005), Buchanan (2006) y Archer *et al.* (2008).

Los escritos sobre las amplias implicaciones sociales del uso de la energía incluyen libros de Ostwald (1912), Ellul (1964), Jones (1971), Odum (1971), Adams (1975, 1982), Smil (1991, 2008) y Schobert (2014). Por último, quien quiera estudiar la historia a través de la evolución de las herramientas y las máquinas debe consultar libros debidamente ilustrados. Las dos obras clásicas insuperables son Ramelli (1976 [1588]) y Diderot y D'Alembert (1769-1772). Ardrey (1894), Abbott (1932), Hommel (1937), Burstall (1968), Hopfen (1969), Williams (1987), Basalla (1988), Finniston *et al.* (1992), Smil (2005, 2006) y la editorial DK (2012) son algunas de las muchas contribuciones modernas.

VACLAV SMIL

Vaclav Smil (Pilsen, 1943) es profesor emérito de Ciencias Ambientales de la Universidad de Manitoba, en el sur de Canadá. Sus investigaciones abarcan temas como la energía, el cambio climático y poblacional, la producción de alimentos, la evaluación de riesgos y las políticas públicas. Ha publicado más de cuarenta libros y 500 artículos relacionados con estos temas. En 2010 fue nombrado por la revista estadounidense *Foreign Policy* como uno de los 100 mejores pensadores del mundo. Es miembro de la Royal Society de Canadá y de la Orden de Canadá.

En la actualidad, su trabajo sobre las transiciones energéticas está recibiendo más atención que nunca debido al enorme desafío de eliminar los combustibles fósiles para frenar el cambio climático.